

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi és Informatikai Kar
Földtudományok Doktori Iskola
Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék

**A VÁROSI FELSZÍN VIZSGÁLATA NAGY TÉRBELI ÉS
SPEKTRÁLIS FELBONTÁSÚ LÉGIFELVÉTELEK
FELHASZNÁLÁSÁVAL**

Doktori (PhD) értekezés

Tobak Zalán

Témavezető: Dr. Mucsi László

Szeged, 2013

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS ÉS KUTATÁSI CÉLOK	2
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	6
2.1. Városi felszínnek vizsgálata közepes és nagy térbeli felbontású szenzorokkal	6
2.2. A kisformátumú légi felvételező rendszerek tapasztalatai	9
2.3. Képalkotó spektrometria – hiperspektrális távérzékelés	11
2.4. Távérzékelte hőmérsékleti információk gyűjtése a városi felszínről	18
3. MINTATERÜLET BEMUTATÁSA – SZEGED	19
3.1. Rövid történeti áttekintés	19
3.2. A felszínborítás és területhasználat általános jellemzői	19
3.3. Városrészek – mintaterületek	21
4. ADATGYŰJTÉS – ELŐFELDOLGOZÁS	23
4.1. Távérzékelte adatok jellemzői – felbontások	23
4.2. Légi adatgyűjtés	26
4.2.1. Kísérési kisformátumú felvételező rendszer (SFAP)	26
4.2.2. AISA Dual hiperspektrális felvételezés	34
4.3. Terepi referenciaadatok gyűjtése	36
4.4. Adatok előfeldolgozása	38
4.4.1. GPS adatok	38
4.4.2. CIR adatok	39
4.4.3. TIR adatok	40
4.4.4. Valós színes (RGB) adatok	41
4.4.5. Hiperspektrális adatok (elő)feldolgozásának lépései	42
5. ADATELEMZÉS	47
5.1. A képi információk kinyerésének lehetséges útjai	47
5.2. Spektrumkönyvtár létrehozása	48
5.2.1. A városi felszín jellegzetes spektrális és geometriai tulajdonságai	48
5.2.2. Spektrumkönyvtár készítése – Szeged példáján	53
5.3. Magassági információk kinyerése a sztereo RGB felvételekből	60
5.4. Szegmentálási lehetőségek a nagy térbeli felbontású adatokon	63
5.4.1. A képi objektumok (szegmensek) osztályozása spektrális és térbeli jellemzők különbértékei alapján	65
5.4.2. A képi objektumok (szegmensek) osztályozása tulajdonságtérbeli szomszédság alapján	69
5.5. A felvételek spektrális információtartamának kinyerése	70
5.5.1. Hiperspektrális adatok klasszifikációja	70
5.5.2. CIR adatok klasszifikációja	77
5.5.3. TIR adatok klasszifikációja	87
5.6. A magassági és spektrális információk integrálása	88
5.7. Osztályozási módszerek értékelése és a térbeli kiterjesztés lehetőségei	90
5.7.1. Optimális adattípusok és algoritmusok	90
5.7.2. Szeged város felszínborítási térképe – lehetőségek és kérdések	91
5.8. Különböző funkciójú és beépítettségű városrészek jellemzése	94
5.8.1. A mintaterületek jellemzése a CLC50 adatbázis alapján	94
5.8.2. A mintaterületek jellemzése az Urban Atlas adatbázis alapján	95
5.8.3. A felszínborítás és a felszínhőmérséklet kapcsolata	96
6. KITEKINTÉS – ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK	99
7. ÖSSZEFOGLALÁS	102
IRODALOMJEGYZÉK	105
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	105
SUMMARY	116
MELLÉKLETEK	119

1. BEVEZETÉS ÉS KUTATÁSI CÉLOK

A Világbank felmérései alapján 2012-ben a Föld népességének 53%-a, az Európai Unióban 74%, hazánkban pedig a lakosság közel 70% volt város lakó (THE WORLD BANK, 2012¹). A CORINE Land Cover² adatbázis 2000-ben 14 európai ország átlagában 4,8%-os, míg hazánkban 5,6%-os városi beépítettséget mutatott. Bár az adatok között egy évtizednyi eltérés mutatkozik, az arányokból is jól látható, hogy egy viszonylag kis területen nagyszámú népesség él, ami intenzíven használt, dinamikusan változó környezetet eredményez. Ez térben és időben is nagy változatosságot jelent a beépítés struktúrájára, a területhasználatra és a felszínborításra nézve egyaránt. Az aktuális állapotok rögzítése, a folyamatos monitoring tevékenység során létrejövő térképi információk fontos szerepet játszanak a várostervezési és városüzemeltetési döntéshozásban.

A városökológia - a városi táj fogalmának értelmezése mellett - térbeli tulajdonságokkal rendelkező objektumként kezeli és vizsgálja ezt a speciális, antropogén hatások alatt álló, egyedi funkciót ellátó rendszert (MEZÖSI ET AL., 1999). A viszonylag kis területen belül megfigyelhető anyagi sokszínűség, a 3 dimenziós kapcsolatok rendszere és a diszkrét objektumhatárok nagy térbeli változékonyságot eredményeznek, ami számos adatgyűjtési és adatfeldolgozási kérdést vet fel (MUCSI, ET AL. 2012).

A városi környezet anyag- és energiaháztartásának vizsgálatához elengedhetetlen a felszínalkotó anyagok spektrális és geometriai tulajdonságainak ismerete. A távérzékeléses adatgyűjtés elmúlt évtizedekben mutatkozó fejlődésének eredményeképpen nagy mennyiségű, de sokszor bonyolult interpretációs lépéseket igénylő adathalmazok váltak elérhetővé, melyek növekvő jelentőségét a városökológiai kutatásokban közel két évtizede felismerték (MUCSI, 1996) és alkalmazzák (MUCSI ET AL., 2007A). A számtalan vizsgálati szempont közül jelen kutatás - az anyagok reflektancia spektrumának vizsgálatán és a nagy geometriai felbontás kínálta sztereo-fotogrammetriai és szegmentációs eljárásokon keresztül - az adathalmazok spektrális és térbeli információtartalmának együttes kinyerésével a felszínborítások elkülönítésére összpontosít.

A városi felszínt felépítő anyagok nagyrészt mesterséges eredetűek. A természetes közeget a városok zöld szigetei, beépítetlen talaj- (vagy kőzet-) felszínei, illetve a folyó és állóvizek jelentik. A mesterséges, vízzáró felszínek amellest, hogy - részben akadályt képezve, részben meggyorsítva a lefolyást - a víz természetes körforgását módosítják, mikroklímát befolyásoló hatással is bírnak. A felszínborítási térképek így a városklíma kutatások számára is fontos bemenő információforrásként szolgálnak (UNGER, 2007). A felszínborítás és a területhasználat sokszor nehezen definiálható kapcsolata mellett a városökológiai és városklíma vizsgálatok szempontjából is érdekes kérdés a felszín- és ehhez kapcsolódóan a légköri hőmérsékletek alakulása.

Kutatásom során nagy térbeli és nagy spektrális felbontású, légi távérzékeléssel gyűjtött adatokkal dolgoztam. Vizsgáltam azok feldolgozásának és kiértékelésének lehetséges módjait és városi környezetben történő alkalmazásait. Eközben Szeged kiválasztott városrészeiről - több adattípust és osztályozó algoritmus tesztelve - nagy méretarányú felszínborítási térképeket készítettem. Kutatási céljaimat az alábbi pontokban foglaltam össze:

1. A városi felszínek vizsgálatában felhasználható távérzékelési adatok kívánt térbeli, spektrális és időbeli felbontásának együttes biztosítása a hagyományos felvételezési módszerekkel nagy költségeket jelent. Kisgépes, kis formátumú (Small Format Aerial

¹ <http://datacatalog.worldbank.org/>

² <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database>

Photography - SFAP) adatgyűjtéssel a felmérések operativitása növelhető, költségvonzatai pedig csökkenthetők. Kutatásom részeként tanszékünkön **saját üzemeltetésű légi felvételező rendszer kiépítésében vettem részt**, melynek adatait munkám során is felhasználtam. A hagyományos légi adatgyűjtő rendszerekkel szemben megjelenő **előnyök és hátrányok bemutatása mellett célom, hogy a képfeldolgozási munkafolyamatokat kidolgozzam és dokumentáljam.**

2. A képalkotó spektrometria megjelenésével egyidejűleg kezdtek meg a kutatók a különböző spektrumkönyvtárak létrehozását. A laboratóriumi körülmények között vagy terepen felvett „tisztá” spektrumok a képosztályozásokhoz biztosítottak referenciát, megadva az ún. végállású tagok (*endmember*-ek) spektrális tulajdonságait. Elsőként a különböző ásványok spektrumait rendezték könyvtárakba, majd az alkalmazások körének bővülésével megjelentek a kőzetek, talaj, növényzet, víz/hó/jég és mesterséges felszínek gyűjteményei is (pl.: USGS, Johns Hopkins, JPL Library). Az első magyar hiperspektrális felvételező kampánnyal hazánkban is elkészültek az első spektrumkönyvtárak, melyek a terepi spektrométerek hazai elterjedésével tovább bővültek. Ugyanakkor idehaza ez idáig nem készült el a jellegzetes városi felszínborító anyagok részletes könyvtára. **Célul tűztem ki, hogy geometriai, radiometriai és atmoszférikus korrekción átesett AISA Dual légifelvételek alapján minél teljesebb spektrumkönyvtárat készítsék a – hazánkra jellemző - mesterséges (városi) felszínekről.**
3. Kutatásomhoz különböző forrásból származó távérzékelte felvételeket használhattam fel. Az adatok eltérő térbeli és spektrális felbontással jellemezhetők, így egymást mintegy kiegészítve, együttesen képesek biztosítani a komplex városi környezet vizsgálatához szükséges nagy geometriai és spektrális felbontást. **Célul tűztem ki olyan (adatfúziós) feldolgozási és kiértékelési módszerek felkutatását, amelyek a különböző adatok integrációja révén képesek kihasználni azok előnyös tulajdonságait, javítva ezzel a városi felszínek osztályozási pontosságát.** A nagy geometriai felbontású színes-infravörös (Color-InfraRed - CIR) és a valós-színes (RGB) felvételek a térbeli mintázat kinyerésében, az AISA Dual hiperspektrális adatok a felszínborítások spektrális alapú elkülönítésében alkalmazhatók eredményesen. A bázisirányú átfedéssel rendelkező felvételek a sztereo fotogrammetriai kiértékelést – azaz magassági információk kinyerését – is lehetővé teszik. Az éjszakai hőkamerás (Thermal-InfraRed - TIR) felvételezések termális információtartalmával az osztályozások pontossága tovább javítható. Az eredmények értékeléséhez terepi és képi referenciaadatok állnak rendelkezésre, melyeket az osztályozások eredménytérképeivel összevetek. **A terepi referencia térképezés támogatására részletes, mobil GIS alapú módszertant dolgozok ki.**
4. A spektrális és térbeli (alaki és magassági) információk kinyerésén alapuló osztályozási módszerek alkalmazásával **Szeged város kijelölt mintaterületeiről felszínborítási térkép** készíthető. Ezzel a korábban is rendelkezésre álló Corine Land Cover (CLC) és Urban Atlas adatbázisoknál nagyságrendileg részletesebb térkép kerül a kutatók és a döntéshozók kezébe. **A rögzített állapotokat – 2008. április 20. (CIR), 2008. augusztus 12/14. (TIR), 2010. szeptember 22. (AISA Dual), 2011. március 30. (RGB) – ábrázoló térképek elkészítése mellett célul tűztem ki azok összevetését a meglévő - Urban Atlas és CLC - adatbázisokkal.**
5. A spektrális reflektancia görbék lefutását befolyásoló (bio)fizika/kémiai tulajdonságok alapján a felszínt borító anyagok viszonylag egzakt módon meghatározhatók. Városi környezetben egy adott felszínborítás (*land cover*) azonban különböző funkciójú területeken is megjelenhet, ami megnehezíti a területhasználat (*land use*) közvetlen térképezését. E probléma megoldása túlmutat jelenlegi kutatási céljaimon. **Célom** azonban

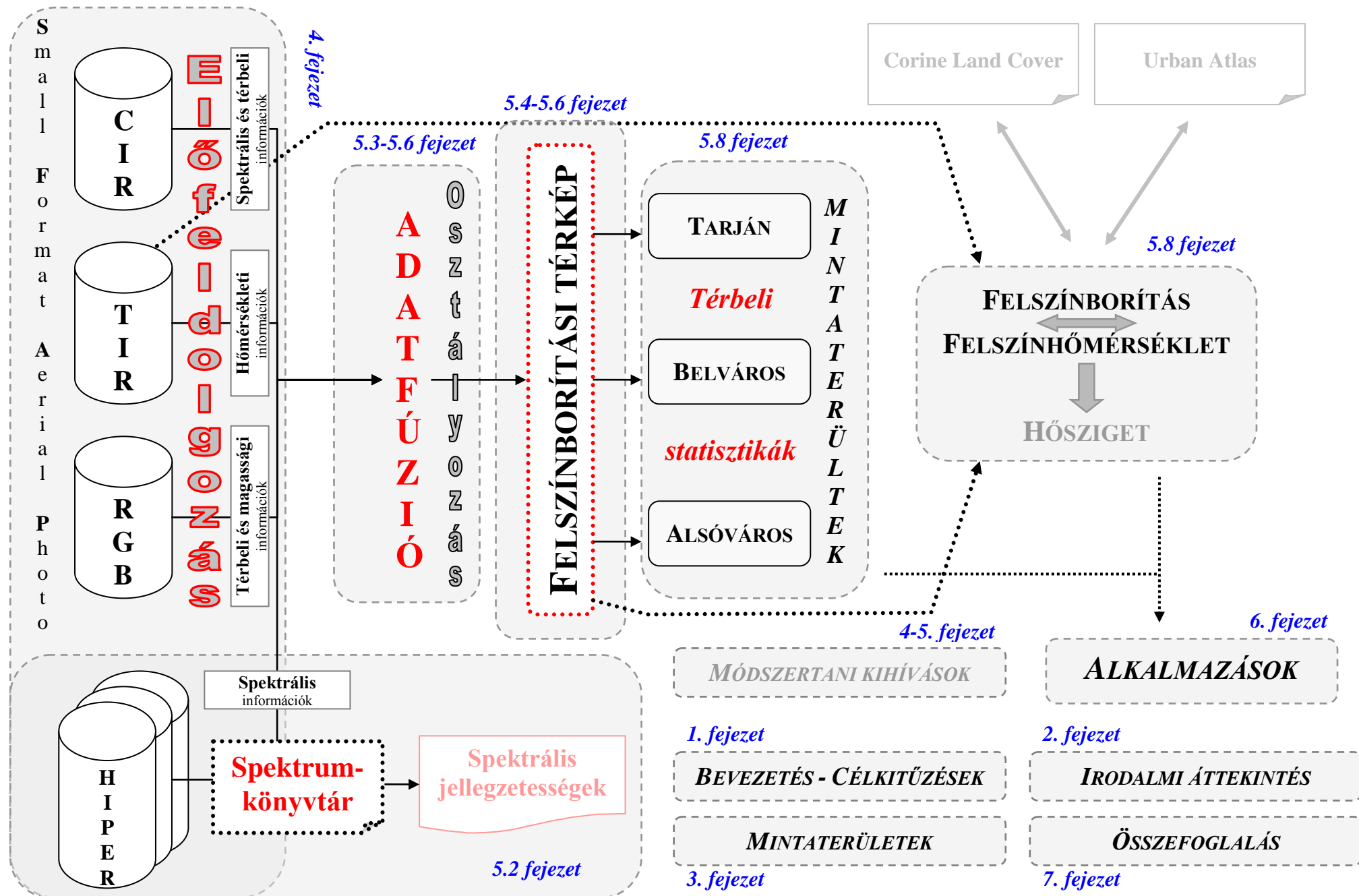
a város különböző – egyéb források alapján ismert – **beépítettségű és hasznosítású mintaterületeire térbeli statisztikai vizsgálatok elvégzése**, melynek alapjául a legnagyobb megbízhatósággal jellemezhető osztályozás eredményei szolgálnak.

6. 2008 nyarán hőkamerás felvételezés készült a város teljes területéről. A naplemente után készített felvételek - radiometriai korrekciót követően – felszínhőmérséklet adatokat szolgáltatnak. Kutatásaim során a nagy térbeli (CIR, RGB) és spektrális (AISA) felbontású állományokat hőtartományú infravörös adatokkal egészíthettem ki, melyek nemcsak a felszínborítások pontosabb osztályozásához járulnak hozzá, de további városökológiai vizsgálatokhoz is lényeges információkat nyújthatnak. A rendelkezésemre álló adatok alapján **célul tűztem ki Szeged kijelölt területein a városi felszínborítás és felszínhőmérséklet kapcsolatának vizsgálatát**, majd az eredményekből **általános következtetések megfogalmazását**.
7. Céljaim között szerepel a nagy térbeli felbontású valós színes (RGB) és színes-infravörös (CIR) felvételek **potenciális alkalmazási területeinek feltárása**, mint például a növényzeti monitoring (egészségi állapot, utak sózásának hatása, fakivágások igazolása, zöldfelület/beépítési arány számítása telkekre és lakótömbökre) vagy 3D városmodellek építése (integrálás geoinformatikai rendszerbe, pl. turisztikai vagy katasztrófavédelmi feladatok támogatására). Ehhez kapcsolódóan röviden bemutatom a termális (TIR) felvételek már megvalósult és jövőbeni alkalmazásait is.
8. A városi környezet nagy térbeli és spektrális felbontású, légi távérzékeléses vizsgálatának **korlátait**, a felmerülő **problémák forrásait** is áttekintem, és próbálok ezekre **megoldási javaslatokat** tenni.

A kutatási célok összefoglalását követően fontosnak tartom megjegyezni, hogy a kutatás során a távérzékelte adatokból levezetett kategóriák csak a felszín anyagi tulajdonságait jellemzik. Ennek alapján a felszínborítási (**land cover**) térképek elkészíthetők ugyan, a funkcionális kategóriák (területhasználat, **land use**) meghatározása azonban további információkat is igényelne, így az nem tartozik kutatási céljaim közé.

Dolgozatom szerkezetének kialakításakor a fent megfogalmazott célokat vettem figyelembe. A kapcsolódó irodalmi előzmények áttekintését követően az adatgyűjtéssel és az interpretációt megelőző előfeldolgozási folyamattal foglalkozok részletesebben, majd az adatelemzési fejezetben a képi információtartalom kinyerésének útjait veszem sorba. Eközben adattípusonként és módszerenként értékelem az elkészült felszínborítási térképeket. Mintaterületenként összevetem az általam levezetett felszínborítást a Corine és Urban Atlas adatbázisokkal és a szintén légifelvételezésből származó felszínhőmérsékletekkel. Végül kitekintésként néhány - a felhasznált adatokra és elkészült térképekre alapuló - már megvalósult, illetve jövőbeni alkalmazási lehetőséget villantok fel.

A következő oldalon folyamatábra formájában is bemutatom az egyes fejezetek logikai kapcsolódását.



2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Kutatásom szakirodalmi előzményeinek feltárása során elsőként a városi térszínék távérzékeléses kutatásának kezdeteit mutatom be röviden, majd fokozatosan közelítek a jelen vizsgálódások alapját is képező nagy térbeli és spektrális felbontású szenzorok alkalmazásainak irányába. Ezek közül is elsősorban a légi platformokon elhelyezett felvételező rendszereket és az ezekhez kapcsolódó adatfeldolgozási fejlesztéseket járom körül. Különös hangsúlyt kívánok fektetni az általunk is alkalmazott kisgépes, kisformátumú légifelvételezés bemutatására, illetve a képalkotó spektrometria – azaz a hiperspektrális távérzékelés – városi környezetben előforduló alkalmazásaira. Mivel hazánkban csak az elmúlt évtizedben jelentek meg az első hiperspektrális felvételek, részletesebben tárgyalom a hazai – nemcsak városi – felhasználási példákat. Az irodalmi áttekintés a hőtartományú felvételezések tudományos előzményeinek felvillantásával zárul.

2.1. Városi felszín vizsgálatára közepes és nagy térbeli felbontású szenzorokkal

A városi felszín tudományos vizsgálatában – az első, ballonról készített légi fényképeket és a háborús információgyűjtést követően – az 1970-es évtől kezdődően használtak fel távérzékelte adatokat. A műholdas szenzorok fejlődését megelőzően ezek még hagyományos vagy színes-infravörös légifelvételeket jelentettek, de a kutatások már ekkor is a városi rendszerek működését meghatározó változások – pl. beépítettség, zöldterületek – monitorozására fókuszáltak. DUEKER és HORTON már 1972-ben a távérzékelte adatok városi felhasználásnak kérdéseivel foglalkozott és megállapította, hogy – a jelenlegi GIS technológiákat még nem ismerve – problémát jelent azok integrálása a hagyományos adatállományokkal. Felismerték, hogy az alkalmazott technológiának – adatgyűjtés és interpretáció szintjén egyaránt – a méretarány, az osztályozási sémák és az adatelemek tekintetében illeszkednie kell a felhasználói igényekhez. Rámutattak a *költségek* és az *adatok előállítására* közti kompromisszum szükségességére is. Az optikai (*passzív*) távérzékelés mellett igen hamar megjelent az *aktív* (radar) technológiák alkalmazása is a városi környezetben (BRYAN, 1975), a vizsgálatok alapadatait azonban sokáig – szinte kizárólagosan – a Landsat program műholdas szenzorai szolgáltatták (WELCH, 1980; FORSTER, 1983). A vizsgálatok által igényelt, megfelelő – térbeli és spektrális – felbontás problémájával viszonylag korán szembesültek (WELCH, 1982; WOODCOCK ÉS STRAHLER, 1987). Woodcock szerint az alkalmazott *felbontás* (skála) sok tényező függvénye: a kinyerni kívánt információ, az alkalmazott elemzési módszer és a terület térbeli struktúrája egyaránt befolyásolhatja a választást. A lokális variancia és a térbeli felbontás összefüggése segítheti a megfelelő felbontás meghatározását. Városi vagy erdős területek esetében például a Landsat TM vagy SPOT felvételek térbeli felbontása mellett is relatív nagy lokális varianciával találkozhatunk, amely lehetővé teszi a különböző térbeli információ kinyerési módszerek alkalmazását. Mezőgazdasági területeken ugyanakkor – az alacsonyabb variancia miatt – csak a klasszikus osztályozó algoritmusok lehetnek megfelelőek. Számos problémát vetett fel FORSTER (1985) is cikkében a heterogén felszínnel, a különböző légköri viszonyokkal, a felvételek geometriai korrekciójával kapcsolatban, melyekre megoldást az elkövetkező évtizedek hoztak.

A hagyományos – *spektrális információkra* fókuszáló – képkiértékelő módszerek mellett egymás után jelentek meg – vagy váltak elterjedté a távérzékelés területén is – a különféle *térbeli információk* kinyerésére alkalmas eljárások, melyhez kezdetben főként nagyfelbontású légifelvételeket, majd később űrfelvételeket is felhasználtak (CONNERS ET AL., 1984; GONG ET AL., 1992). HEROLD ÉS TÁRSAI (2001) szegmentált légifelvételek alapján

határozták meg különböző felszínborítási struktúrák főbb metrikáit (*landscape metrics*) és jellemző textúráját. Ezen másodrendű képi információk segítségével sikerült jól elkülöníteniük három fő beépítési kategóriát (ipari-kereskedelmi, sűrűn és ritkábban beépített lakóövezetek).

A felszínborítás vizsgálatok mellett – az 1980-as évek közepétől – egyre több kutatás foglalkozott a **felszínhőmérséklet** detektálásával is (ROTH ET AL., 1989; NICHOL, 1996; VOGT ÉS OKE, 1998; STREUTKER, 2002; WENG, 2003, 2004). Mivel ilyen jellegű adatfelvétellel és alkalmazással jelen vizsgálataimban is foglalkozok, a kutatási előzmények bemutatására a későbbiekben külön fejezetet szentelek.

A városi felszínek távérzékeléses kutatásában újabb mérföldkövet jelentett a RIDD által 1995-ben publikált **VIS modell**. Ez a városi (és város-közei) felszíneknek olyan egységes, ökológiai szemléleten alapuló osztályozását adja, mely lehetővé teszi a különböző városok egymás közti és időbeli összevetését, változásvizsgálatát (pl. városnövekedés, urbanizáció környezeti hatásai, energia- és vízháztartás). A modell vegetációs, vízzáró és talajfelszín komponenseket különít el, megadva ezek keveredési arányát.

Az egyéb földrajzi **adatok** és a távérzékelte felvételek **integrációjával** – a földrajzi információs rendszerek (GIS) és a távérzékelés adat és eszköztárának kombinálásával - HARRIS és VENTURA (1995) sikeresen javította a TM adatok osztályozásának pontosságát és növelte az azonosítható osztályok számát. A későbbiekben számos példát láthatunk a különböző típusú adatok és adatfeldolgozási módszerek integrálására.

A szükséges **tér- és időbeli felbontás** szemszögéből vizsgálta JENSEN ÉS COWEN (1999) a távérzékelte felvételek felhasználásának lehetőségeit a városi és elővárosi infrastruktúra térképezésében és a szocio-ökonómiai információk kinyerésében. Megállapították, hogy már a közepes felbontású (Landsat TM, SPOT, IRS-1) (10-30 m, 1-55 nap) szenzorok is képesek ilyen igények kielégítésére, de az akkoriban fejlesztés alatt álló nagyfelbontású rendszerek (Ikonos, Quickbird és légi digitális kamerák) további kapacitásokat jelentenek.

Lézeres technológia terjedésével új alkalmazások jelentek meg a városi környezetben is. HAALA ÉS BRENNER (1999) multispektrális felvételeket és lézeres magassági adatokat felhasználva épület és fa objektumokat térképezett. A LIDAR felmérésekből származó magassági információk segítségével a spektrálisan hasonló objektumok – például hasonló anyagú út- és tetőburkolatok – egymástól könnyen elválaszthatóak.

A nem megfelelő térbeli felbontás következtében megjelenő **kevert pixelek** problémájára új módszerek hoztak megoldást. SMALL (2001) Landsat TM adatokon a lineáris SMA (*Spectral Mixture Analysis*) módszert használta a növényzet arányának térképezésére. WU és MURRAY (2003) hasonló módszerrel – a VIS modellt alapul véve – ETM+ adatokkal ért el jó eredményeket. YANG ÉS TÁRSAI (2003) a vízzáró felszínek subpixel-alapú változás vizsgálatára dolgozott ki módszert. SMALL (2003) már nagyfelbontású adatokon is alkalmazta az SMA módszert, és megállapította, hogy a három-komponensű lineáris SMA konzisztens, széles körben alkalmazható módszert nyújt a városi reflektancia jellemzésére. WENG ÉS TÁRSAI (2004) a felszínhőmérséklet és a vegetáció arányának kapcsolatát vizsgálva a hagyományosan alkalmazott NDVI értékek helyett az SMA módszert használta. Mivel a felszínhőmérséklet értékek valamivel erősebb negatív korrelációt mutattak a - szétkeveréssel kapott - növényzet frakcióval, mint az NDVI értékek, ezt az eljárást használhatóbbnak ítélte.

STEFANOV ÉS TÁRSAI (2001) tudásalapú vagy más néven **szakértő (expert) rendszert** alkalmaztak a városi felszínborítás osztályozására. A logikai döntési szabályokon alapuló eljárás lehető tette a távérzékelte adatok integrációját további GIS és egyéb levezetett (pl. térbeli textúra) fedvényekkel.

Az egyre **jobb minőségű alapadatok** és a **fejlett képfeldolgozási módszerek** egyre **speciálisabb alkalmazásokat** tettek lehetővé. HINZ és BAUMGARTNER (2003) a városi úthálózat kinyerésére tett kísérletet több nézőpontból készített légifelvételek felhasználásával. THOMAS ÉS TÁRSAI (2003) nagy térbeli felbontású adatokkal – a nagy intenzitású csapadékok

lefolyásának modellezése céljából – térképezték a városi vízzáró felszíneket, és a különböző felszínborítás kinyerés módszereket – mint például a kombinált automatikus és irányított osztályozás, a raszter-alapú térbeli modellezés és a klasszifikációs fát használó szegmentáció – értékelték. SHACKELFORD ÉS DAVIS (2003) Ikonos felvételeket osztályozott hierarchikus fuzzy módszerrel, mely a spektrális és térbeli információkat egyaránt felhasználta. Ezzel a hagyományos klasszifikációs eljárásoknál 8-10%-kal jobb eredményt értek el. BENEDIKTSSON ÉS TÁRSAI (2003) pankromatikus felvételek (Ikonos, IRS-1C) többlépcsős kiértékelését végezte el, melyhez matematikai morfológiai operátorokat és neurális hálózatokat is bevetett. SAWAYA ÉS TÁRSAI (2003) nagyfelbontású Ikonos és Quickbird képek alapján végzett munkájával igyekezett felhívni az erőforrásokat kezelő szakemberek figyelmét a távérzékelte adatok szerepére a felszín és vízkészlet gazdálkodásban.

A **nagy térbeli felbontású műholdas szenzorok** – Ikonos, Quickbird – megjelenéséig csak légi felvételezésből nyerhettünk olyan távérzékelte adatokat, melyek térbeli információtartalma megfelelt a városi felszín és folyamatok részletes vizsgálatának. Ezek a műholdas szenzorok – a légifelvételekkel megegyező vagy annál alig rosszabb térbeli felbontás mellett – nagy spektrális információtartalommal is rendelkeznek. Erre építve végzett NICHOL ÉS LEE (2005) biomassza számításokat Ikonos MS felvételeken. Az idő- és költség-tényezők összevetése alapján megállapították, hogy a VHR (*very high resolution*) műholdképek költséghatékonyabb megoldást jelentenek a városi növényzet monitoringjában.

A kinyerhető képi információmennyiség növekedésével olyan új alkalmazások jelentek meg, melyek már **komplex objektumok térképezését** célozták. Vonalas objektumok (úthálózat) kinyerésére alkalmas módszer tesztelését végezte SHI ÉS ZHU (2002) nagyfelbontású műholdképek alapján. A *line segment matching* eljárás városi területen mind vizuális hatásában, mind helyzeti pontosságában megbízható eredményt szolgáltatott. LONG ÉS ZHAO (2005) az úthálózat kinyerését a hagyományos – él- és vonaldetektáláson alapuló – módszerektől eltérően végezte el. Többlépcsős, automatikus eljárásuk térbeli információk kinyerésén és feldolgozásán alapult (morfológiai operátorok, filterezés, szegmentálás). ZHANG ÉS COULOIGNER (2006) az útfelületek és parkolók – azonos anyagminőségből eredő - gyakori osztályozási problémájára talált megoldást: szegmens alapú, Fuzzy logikát és alakzatleíró metrikákat alkalmazó módszert fejlesztett ki.

WEI ÉS TÁRSAI (2004) nagyfelbontású pankromatikus Quickbird műholdképekből nyertek ki **épületeket** klaszterezéssel és éldetektálással. Módszerükben – a sokszor csak zavaró tényezőnek tekintett – **árnyékokat** mint az épületek jelenlétének bizonyítékát használják fel. DARE (2005) áttekintésében kimondottan az árnyékokra koncentrált, és megállapítja, hogy bár különböző módszerekkel azonosítható és csökkenthető negatív hatásuk, az eredmény a felvétel függvényében igen változó lehet. PUISSANT ÉS TÁRSAI (2005) a nagyfelbontású adatokból történő automatikus információkinyerés problémáival foglalkoznak. Az osztályozási pontosságot növelő spektrális és térbeli megközelítéseket hasonlították össze. A leghasznosabb térbeli indexnek a homogenitást találták, amellyel 1 méteres felbontás mellett még az árnyékhatás is csökkenthető.

DEL FRATE ÉS TÁRSAI (2007) az addig nagyrészt csak közepes felbontású adatokon alkalmazott **neurális hálózatokat** használta Quickbird felvételek és idősoros adatok osztályozására. PACIRICI ÉS SOLIMINI (2007) szintén mesterséges neurális hálók felhasználásával kísérelte meg az osztályozási hibák – sokszor nagyarányú – manuális ellenőrzésének automatizálását multispektrális és multitemporális adatokon.

Láthatjuk tehát, hogy az 1970-es évek első alkalmazási példái óta mind az alapadatok minőségében – térbeli és spektrális felbontásában, illetve elérhetőségében is –, mind a feldolgozási módszerekben nagymértékű fejlődés történt, ami egyre összetettebb alkalmazásokat tett lehetővé.

2.2. A kisformátumú légi felvételező rendszerek tapasztalatai

A kisformátumú légi felvételező rendszerek (Small Format Aerial Photography - SFAP) a hagyományos – légi vagy műholdas – eljárásokhoz képest olyan költségghatékony adatgyűjtési alternatívát kínálnak, amely képes alkalmazkodni a vizsgálandó objektumok méretéhez, ideiglenes megjelenéséhez és változásának sebességéhez, azaz a céloknak megfelelően a lehető legjobb térbeli és időbeli felbontás szolgáltatja. Ezeknek a feltételeknek a konvencionális megoldások gyakran vagy nem felelnek meg, vagy épp nem elérhetőek. A néhány 100 méteres repülési magassággal olyan felvételezési helyzetek is megteremthetők, melyet a repülési szabályozások egyébként nem tennének lehetővé. A kisformátumú adatgyűjtés így hidat képez a felszíni megfigyelések és a hagyományos légi és műholdas távérzékelés között. A technológiai fejlődés természetesen ezt a területet sem hagyta érintetlenül, a filmes kamerák – analóg – felvételei után napjainkra a digitális megoldások lehetővé teszik a szinte valós idejű kiértékelést, valamint új utakat nyitottak a képfeldolgozási módszerek területén is (ABER ET AL., 2010).

Kisformátumú fényképezés alatt a 35 és 70 mm-es filmes – és ennek megfelelő digitális – kamerák használatát értjük, melyeket eredetileg hagyományos – kézi – használatra készítettek. Ember vezette vagy távirányítású hordozóeszközön is rögzíthetők, és néhány 10 méteres magasságtól akár több 100 kilométerig szolgáltathatnak felvételeket (ABER ET AL., 2010).

A következőkben ennek a fejlődési folyamatnak mutatom be a legfontosabb állomásait, kiemelve a technológiai és felhasználási mérföldköveket. A repüléssel az emberiség régi vágya teljesült: madártávlatból szemlélhette környezetét. Ezt bizonyítják a már jóval az első, 19. századi légi felvételezés megjelenése előtt készült perspektivikus térképábrázolások. Ezekben az esetekben azonban „csupán” a térképkészítő képzelőerejének eredményről beszélhetünk (ABER ET AL., 2010).

Az első dokumentált légifotózás 1858-ban a francia *Petit Bicetre* városka fölé ballonnal emelkedő *Gaspard Félix Tournachon* nevéhez fűződik (COLWELL, 1997), míg a legkorábbi fennmaradt felvételt Boston városáról készítette *King* és *Black* 1860-ban. Az amerikai függetlenségi háborúban a hidrogén töltetű ballonokról készített képeket már az ellenség megfigyelésére használták (JENSEN, 2007). 1887-ben egy német erdész erdők faállományának megfigyelésére és felmérésére használt légifelvételeket. Az 1850-es években készült az első sztereo felvételezés, amit optikai fejlesztések is kísérték (ZAHORCAK, 2007). Sárkányról először az 1880-as években készültek fotók (COLWELL, 1997). A 20. század első évtizedét a sárkányos légifotózás aranykorának tekintik. A ballonos megoldások túl költségesnek és veszélyesnek bizonyultak, a repülés pedig épp csak kibontakozóban volt akkoriban. Az I. világháborút megelőző évektől kezdődően – a repülőgépes felvételezések előretörésével – az 1920-as évek közepére a sárkányok alkalmazása fokozatosan visszaszorult. Az első motoros gépről készített kép *L.P. Bonvillain* nevéhez fűződik (1908). Az I. világháború a kamerák és a módszerek terén is fejlődést hozott, ekkora a sztereo képkészítés is általánossá vált. 1910-ben *R.W. Wood* elkészítette az első közeli infravörös és közeli UV felvételt (FINNEY, 2007). A háborút követően, az 1920-as és 1930-as években a civil - térképészeti, mérnöki, erdészeti - alkalmazások kerültek előtérbe. *Carl Troll*, német geográfus, mutatott rá először a légifelvételek felhasználási lehetőségeire a tájökölógiai vizsgálatokban (1939). A II. világháború nemcsak újabb technikai fejlődést hozott, de megjelent az egyre nagyobb sebességű és magasságú képkészítés is, és fokozatosan önállósodni kezdett a térképészeti célú, nagyformátumú (9 inch-es) felvételezés. A korszak legfontosabb újítása azonban a színes-infravörös képek megjelenése volt. Az eredetileg az álcázott ellenség felderítéséhez bevetett technológiának napjainkra széles felhasználási területe alakul ki, többek között a növényzeti és városi felszínek monitoringja. A háború után újra a civil célú fejlesztésekre terelődött a figyelem, amit tovább gazdagítottak a Hidegháború technikai újításai (U2, Corona, Zenit). Az úrkorszak beköszöntével Föld körül keringő platformokon (Skylab, STS,

ISS) is megjelentek kisformátumú kamerák. Ezzel párhuzamosan új lendületet kaptak a sárkány, ballon, vitorlázó és ultrakönnyű repülő típusú hordozó eszközök, az alkalmazási területek pedig fokozatosan bővültek. A fejlődéshez hozzájárultak az egyre modernebb számítógépes hardver és szoftver komponensek.

Az elmúlt évtizedekben, az egyre fejlettebb nagyformátumú légifelvételzés és műholdas szenzorok mellett is számos alkalmazási példáját találhatjuk a kisformátumú felvételzéseknek. Ezek mindegyikében a *költséghatékonyságot* és az *operativitást* hangsúlyozzák a hagyományos légi adatgyűjtéssel szemben (HARNEY ET AL., 1973; SPENCER, 1978; GRAHAM, 1988). A hagyományos felderítő (WOODCOCK, 1976), térképészeti (SPENCER, 1978), geológiai (KLEIN, 1970; WRACHER, 1973) és vegetációs célú vizsgálatok (HARNEY ET AL, 1973; HAMANN ET AL., 1984; SPENCER, 1998) mellett korán megjelentek a *városi alkalmazások* is (TAPPE, 1980). Érdekes színfoltként az állatvilág monitorozás, egyedszámlálás terültén is felhasználtak kisformátumú felvételeket (HARAMIS ET AL., 1985; POOLO, 1989). A 80-as évek elején a hollandiai ITC (Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation) szervezett kisformátumú felvételzéseket a fejlődő világ rohamosan növekvő – szabálytalan struktúrájú – városaiban (HOFSTEE, 1984). Ezzel a technikával hatékonyan sikerült térképezni a folyamatosan módosuló településszerkezetet, alapadatokat szolgáltatva a várostervezők részére. A programhoz kapcsolódóan a felvételek kiértékelését és a térképezést segítő számítógépes szoftvercsomagot is kifejlesztettek (MASMAP) (DE BRUIJN, 1984). Városi alkalmazások sora született a fejlődő országokban (MISRA, 1986; KUPFER ET AL., 1987). A nagy méretarányú térképezések ezekben a városokban kisformátumú felvételek kiértékelésével valósultak meg (JUPPENPLATZ, 1991; NAZIM, 1992).

A felvételzés sokszor szimultán színes, fekete-fehér és/vagy színes infravörös filmre készült. Technológiai fejlődést bemutató tanulmányok születettek a különböző típusú filmek, szűrők és objektívek alkalmazhatóságáról is (HAMANN ET AL., 1984). WARNER (1989) kutatásaiban az SFAP fotogrammetriai alkalmazásaira koncentrált, és a nyilvánvaló költségbeli előnyök mellett felhívta a figyelmet a kis képméret és a geometriai bizonytalanságokból adódó *hibákra* is. Az 1990-es évektől – a GIS térhódításával – tovább növekedett az igény a nagyméretarányú, helyi térképezések iránt. A kisformátumú felvételek és a digitális fotogrammetria ilyen célú alkalmazhatóságát – gyakorlati, pontossági és gazdasági kritériumok alapján – vizsgálta FRASER ÉS TÁRSAI (1995). Az első **digitális kamerák** megjelenésük után nem sokkal a SFAP területén is bevetésre kerültek (MILLS ET AL, 1996; MASON ET AL., 1997). Utóbbi Kodak DCS460 kamerával készített sztereo képpárokat feldolgozva 20 cm horizontális és 60 cm magassági pontosságot ért el 1:18500-as méretarány mellett. ROWE ÉS TÁRSAI (1999) térképezési célú vizsgálatukban több geometriai pontatlanságot növelő hibaforrást soroltak fel, mint például a kontrollálatlan mozaikok, a lencse torzítások, a billegés és pozíció bizonytalansága, valamint a változó méretarány. A gyorsan változó felszín megfigyelésére HAPKE ÉS RICHMOND (2000) szolgáltat példát: a dinamikus morfológiájú tengerpartokról – egy-egy nagyobb vihar után – fotogrammetriai eljárásokkal állítottak elő domborzatmodellt és ortofotókat. Rámutattak, hogy a kisformátumú légifelvételzés a folyamatos monitoring költséghatékony módszere.

Az új alkalmazások keresése mellett nagy figyelem irányult a felvételzési technológia fejlesztésére is. A legnagyobb problémát a felvételek nem megfelelő helyzeti pontossága jelentette. A kamerák mellett abszolút és relatív pozíciót rögzítő GPS/INS berendezés került a gépekre. ABD-ELRAHMAN ÉS TÁRSAI (2001) a felszíni illesztéshez kisebb felbontású – műholdas (IRS) és légi – felvételeket használtak. Sikeres illesztést csak a fás, lombkoronával fedett területeken nem tudtak végrehajtani. LYLE (2003) a felvételző rendszert Real Time Kinetic (RTK) GPS-szel egészítette ki, így néhány cm pontos valós idejű georeferálást biztosítva.

A fás vegetáció megfigyelésének érdekes példáját adta KEY ÉS TÁRSAI (2001). Különböző fenológiai fázisokban – májustól októberig 9 alkalommal – készített RGB és CIR felvételek felhasználásával 4 fafajt sikerült elkülöníteniük. Az osztályozásban az őszi és a

tavaszi képek adták a legjobb eredményt. Kutatásuk legfőbb eredménye, hogy rámutattak: a korlátozott spektrális felbontás részben kompenzálható az idősoros adatokkal. LI ÉS TÁRSAI (2005) nyomornegyedek (*informal settlements*) gyors térképezésére használtak kisformátumú felvételeket. A képek színei alapján morfológiai módszerekkel (pl. éldetektálás) sikerült az épületeket azonosítani és elkülöníteni környezetüktől. Az általunk is használt DuncanTech MS3100 kamerát – a hagyományos terepi és laboratóriumi felhasználás mellett – légi felvételezésre is alkalmazták: DIKER ÉS TÁRSAI (2004) termésmennyiség monitorozása céljából végzet CIR adatgyűjtést. Az épített környezet vizsgálatára szolgáltat érdekes példát CHEN ÉS TÁRSAI (2010). Hidak állapotfelmérésében alkalmazott kisformátumú légifelvételeket, melyek segítségével költséghatékonyan monitorozhatók akár a kisebb felületi repedések is. Problémát okozott azonban a változó megvilágítás hatása, a fák árnyéka és az időjárási és közlekedési terhelésnek kitett felületek eltérő reflektanciája.

Összességében elmondható tehát, hogy a kisformátumú légifelvételezéseket igen széleskörűen, sokszor egészen speciális alkalmazási területen vetik be, miközben gyakran előkerül a költségek minimalizálásának kérdése. Számos publikációban olvashatunk a módszer korlátairól, és azok – gyakran kompromisszumos – megoldási lehetőségeiről.

2.3. Képalkotó spektrometria – hiperspektrális távérzékelés

A hiperspektrális képalkotás (*hyperspectral imaging*) kifejezést először az 1980-as évek közepén használták (GOETZ ET AL., 1985). Az elnevezésben a „hiper” előtaggal a spektrális sávok (túl) nagy számára utaltak, ami azonban lehetőségeket biztosított az adatok statisztikai elemzésére. Jóllehet egy-egy anyag azonosítására akár néhány sáv információtartalma is elegendő lehet, a földfelszín – egymással gyakran keveredő - anyagainak térképezésekor a nagy mennyiségű adat nagyobb megbízhatóságot, osztályozási pontosságot nyújt. A számítógépes rendszerek fejlődésével az adattárolás és feldolgozás problémája is fokozatosan megoldódott. A képalkotó spektrometria vagy spektroszkópia első definíciója is Goetz-től származik (GOETZ ET AL., 1985), aki szerint olyan képrögzítési eljárást kell alatta érteni, amely több száz folytonos, regisztrált spektrális sávban történik, és ezáltal minden egyes pixelnek radiancia spektrumot állít elő. A folytonos spektrum nemcsak a felszíni anyagok pontos azonosítását tette lehetővé, de kiszűrhetővé váltak az atmoszférikus hatások is, melyek miatt a multispektrális szenzorok kizárólag az ún. atmoszférikus ablakokban képesek dolgozni. A görbe alakjából továbbá következtetni lehetett a szemcseméretre, eloszlásra és összetételre (pl. ásványok, klorofill) is. Emellett korrelációs módszerekkel összevethetők referencia adatokkal, a kevert spektrumú pixelekről pedig szétkeverési (*spectral unmixing*) eljárásokkal megállapítható az egyes komponensek relatív aránya is (SMITH ET AL., 1985, BOARDMAN, 1993).

Az első fejlesztések megindulásától közel 15 évnek kellett eltelnie, mire olyan szintre jutottak az egyes komponensek – szenzorok, szoftverek, adatfeldolgozás módszertana –, hogy a szélesebb tudományos közösség is felfedezhette – és hatékonyan alkalmazhatta – a hiperspektrális távérzékelés előnyeit.

A következőkben a terepi, légi és műholdas hiperspektrális szenzorok fejlődésének legfontosabb eseményeit mutatom be röviden.

Az első Landsat (ERTS-1) műhold multispektrális szkennereinek (MSS) felszíni kalibrációjához már **terepi spektrométert** (*Portable Field Reflectance Spectrometer* - PFRS) használtak. Ennek adatai alapján alakították ki a fejlesztők a következő generációs Landsat TM szenzor sáv kiosztását (GOETZ, 2009), majd 1981-ben az űrsiklón elhelyezett SMIRR (Shuttle Multispectral Infrared Radiometer) műszert is, mellyel először sikerült Föld körüli pályáról felszíni ásványokat (kaolinitet és kalcitot) azonosítani. A terepi műszerek következő generációjával (*Portable Instant Display and Analysis Spectrometer* - PIDAS) 30 helyett már 4 másodperc alatt elvégezhető volt egy mérés, míg az ASD (*Analytical Spectral Devices*)

Fieldspec sorozata a gyors működés (100 ms) mellett könnyebb hordozhatóságot is biztosított. A terepi mérések eredményei világosan megmutatták, hogy a földfelszín vizsgálatához a látható (VIS) és rövidhullámú infravörös (SWIR) tartományok szolgáltatják a legtöbb információt (HUNT, 1977). A légi és műholdas szenzorok kalibrálásának leggyakrabban használt helyszíne a nevadai *Cuprite* környéki hidrotermális régió lett. Ez utóbbi területen az első **repülőgépes spektrométerrel** (*Airborn Imaging Spectrometer* – AIS, NASA JPL) a 2030-2320 nm-es tartományt térképezve sikerült azonosítani a *buddingtonite* ásványt, ami – miután az arany egyik nyomjelzőjének tartották – tovább növelte az érdeklődést a technológia iránt. A NASA három rendszer létrehozását tűzte ki célul: (1) légi képalkotó spektrométer, amely a látható és infravörös tartományokat fedi le (*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* - AVIRIS), (2) űrrepülőre telepíthető szenzor (*Shuttle Imaging Spectrometer Experiment* - SISEX) és (3) orbitális pályán keringő nagy felbontású felvételező rendszer (*High-Resolution Imaging Spectrometer* - HIRIS) (GOETZ, 2009). Az AVIRIS első repülésére 1987-ben került sor, és mára – több átalakítást és fejlesztést követően - a legtöbbet használt, legjobban kalibrált légi felvételező rendszer lett. A SISEX fejlesztése a Challenger 1986-os katasztrófáját követően leállt, a HIRIS pedig átkerült az EOS (*Earth Observation System*) programba. A kezdeti időszakban a fejlődést sok tényező hátráltatta. A tudományos érdeklődés hiányát a nem pontosan tisztázott célcsoportok és problémakörök, a még kevés és gyenge minőségű adatsor, az adatfeldolgozási módszerek és szoftverek hiányos volta, illetve a számítási kapacitások szűkössége magyarázta (GOETZ, 2009).

A műholdas platformra telepített szenzorok közül kettőt érdemes kiemelni. A NASA első képalkotó spektrométerét – a *Hyperion*-t – az EO-1 műholddal 2000 novemberében állította Föld körüli pályára (KRUSE ET AL., 2002). A szenzor a 400-2500 nm-es tartományt 220 darab 10 nm széles sávval fedi le, térbeli felbontása 30 m. Az Európai Űrügynökség (ESA) 2001-ben felbocsátott műholdja, a PROBA fedélzetén szintén elhelyezett egy hiperspektrális képalkotó szenzor, a *CHRIS*-t (Compact High Resolution Imaging Spectrometer). A műszer a 415-1050 nm-es tartományban 5-12 nm-es spektrális sáv szélességekkel, de egyidejűleg csak 19 sávban képes felvételezni. A felvételek térbeli felbontása – nadír helyzetben – 20 m (VAN MOL ÉS RUDDICK, 2004).

A légi hiperspektrális szenzorok területén az 1980-as évek végétől az **AVIRIS** mellett folyamatosan megkezdődött a kereskedelmi célú eszközök fejlesztése is. Az elsők között jelent meg a DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) és a GER (*Geophysical & Environmental Research Corp.*) 79 sávós spektrométere a **DAIS** (*Digital Airborne Imaging Spectrometer*) (RICHTER, 1996); 1989-ben a kanadai (*ITRES Research*) **CASI** (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) (DECKER ET AL., 1992); 1994-ben az amerikai (*Naval Research Lab.*) **HYDICE** (*Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment*) (BASEDOW ÉS ZALEWSKI, 1995)– amit végül katonai felhasználásra korlátoztak – és az ausztrál **HyMap** (KRUSE ET AL., 2000). A szintén német **ROSIS** (*Reflective optics system imaging spectrometer*) szenzor első tesztrepülésére 1992-be került sor, a jelenlegi verzió 1999-től működik (DELL'ACQUA, 2005). A kínai tudományos akadémia **PHI** (*Pushbroom Hyperspectral Imager*), **OMIS** (*Operative Modular Imaging Spectrometer*) és **HDCS** (*Hyperspectral Digital Camera System*) képalkotó berendezései az 1990-es évektől sok kutatásnak szolgáltattak alapadatot (TONG ET AL., 2004). 1994-től alkalmazzák az olasz fejlesztésű **MIVIS** (*Multispectral Infrared Visible Imaging Spectrometer*) eszközt (BIANCHI ET AL., 1996). Az **AISA** légiszenzor család az 1995-ben alapított finn SPECIM cég légi hiperspektrális szkennere. Jelen kutatás keretében ennek **Dual** verziójával készült felvételeket dolgoztam fel. Végül említést érdemel még az AISA norvég (NEO –Norsk Elektro Optikk A/S) fejlesztésű konkurense, a **HySpex** sorozat (SKAULI ET AL., 2006). A szenzor különböző típusait széles körben alkalmazzák (KRAPEZ ET AL., 2012, SICOT ET AL., 2011), többek között német kutatóintézetek (DLR, GFZ) és egyetemek (Universitát Trier).

Az ún. pushbroom szkennerek mellett az utóbbi évek új fejlesztési irányát képviselik a kisméretű – így akár pilóta nélküli (UAV) eszközre is telepíthető –, mozgóképek készítésére is alkalmas hiperspektrális mátrix kamerák. Ezek legfőbb előnye a gyors, jó minőségű és egyszerű adatgyűjtés (JUNG ET AL., 2013).

A szenzorok megjelenésével párhuzamosan indult meg a feldolgozó **szoftverek** fejlesztése is. 1989-ben még nem létezett olyan kereskedelmi program, ami 10-nél több spektrális sávval képes lett volna dolgozni. A kezdő lépést a – több számítógépes platformon is használható - IDL (*Interactive Data Language*) adta meg, melyre épülve – az SIPS (*Spectral Image Processing System*) projekt eredményeit felhasználva (KRUSE ET AL., 1993) – Boardman és Kruse vezetésével kifejlesztették az ENVI szoftver csomagot (1994), ami a mai napig a legelterjedtebb a hiperspektrális képfeldolgozásban. Ezzel nemcsak szélesebb körben válhatott elterjedté a technológia, de sorra jelentek meg a tudományos publikációk is. A szoftver folyamatos fejlesztésével újabb képfeldolgozási módszerek jelentek meg és váltak elérhetővé a felhasználók számára.

Az atmoszférikus ablakokban működő multispektrális szenzorokkal ellentétben a hiperspektrális felvételezés során a jelentős légköri – vízgőz és aeroszolok – abszorpcióval kell számolnunk. Az atmoszférikus vízgőz hatásának korrigálására az első programot GAO ÉS TÁRSAI 1993-ban adták közre. Ettől kezdve gyors fejlődés következett nemcsak a szenzorok esetében, de a képfeldolgozási módszerek és szoftverek területén is: külön említést érdemel a kínai HIPAS (*Hyperspectral Image Processing and Analysis System*) (ZHANG ET AL., 2000). A szoftveres fejlesztéseket a már megfelelő teljesítményű (számítási kapacitás, tárhely, memória) hardverek megjelenése is támogatta.

További előrelépést jelentett a különböző **spektrumkönyvtárak** – mint például Johns Hopkins University (JHU), Jet Propulsion Laboratory (JPL), United States Geological Survey (USGS) gyűjteményeinek - létrehozása is, ami a pixel-alapú osztályozások fontos alapinformációit adta.

A következőkben nemzetközi irodalmi áttekintés keretében mutatom be a hiperspektrális távérzékelés városi alkalmazásainak sorát. Ezek sokszor nemcsak a felhasznált adatokban, de az alkalmazott feldolgozási módszerekben is különböznek egymástól. Vizsgálati tárgyuk a városok egy-egy kiválasztott alrendszere.

A hiperspektrális távérzékelés első alkalmazásai **geológiai, ásványtani térképezések**hez kötődnek (ABRAMS ET AL., 1977; GOETZ ET AL., 1985). A csupasz talajfelszíneknél – vagy kőzet kibukkanásoknál – jóval nagyobb területet borít azonban **növényzet**, így ennek vizsgálata is korán előtérbe került (WESSMANN ET AL., 1988). A fajok azonosításán túl egészségi állapotuk, víz- és klorofil-tartalmuk is meghatározható lett. További kutatási területeken is megjelent a képalkotó spektrometria, mint a **partvidékek** vagy a **hóval** és **jéggel** borított régiók. A **városi környezet** vizsgálatában csak a '90-es évek második felében kezdtek el nagy tömegben alkalmazni a nagy spektrális felbontású adatokat. KALMAN ÉS BASSETT III (1997) HYDICE felvételek alapján osztályozta a városi felszínborításokat. FUNG ÉS TÁRSAI (1998) Hong Kong területén 6 gyakori fafaj térképezésére használták fel a 600-900 nm-es tartományt. ZHANG ÉS TÁRSAI (1998) a spektrális információk mellett már a képekből - éldetektálással - kinyerhető térbeli információkat is felhasználta. Városi és városon kívüli területről nyert AVIRIS spektrumokat vizsgált és hasonlított össze QUI ÉS TÁRSAI (1999). Az összes sávra kiszámított fraktál dimenzió (D) értékek alapján megállapították, hogy az atmoszférikus elnyelési és szóródási zónákban – ahol magas jel-zaj arány (SNR) figyelhető meg – szokatlanul magas D értékek adódtak. Ez a módszer nemcsak a zajos sávok azonosításában segíthet, de a különböző felszíntípusok elkülönítésében is. Hasonló módszert alkalmazott később idehaza Berke és csapata is (KOZMA-BOGNÁR ET AL., 2010). SEGL ÉS ROESSNER (1999) Drezdáról készült DAIS 7915 képeket elemezve fejlesztett pixelalapú endmember (tisza vagy végállású pixel) kijelölő módszert, melyet a lineáris spektrális

szétkeveréshez alkalmazott. A sok, spektrálisan hasonló endmemberrel jellemezhető városi környezetben a módszer a hagyományos szétkeveréses eljárásoknál jobb eredményt adott. Módszerüket később alaki információkkal is kiegészítették és pontosították (ROESSNER ET AL., 2001). BHASKAR ÉS DATT (2000) szerint a várostervezési és management feladatokhoz költséghatékony támogatást nyújthatnak a hiperspektrális felvételek. Szintén ausztrál kutatók Sydney jégesők által veszélyeztetett területeit (tetőtípusait) térképezték hiperspektrális és GIS adatok felhasználásával (BHASKARAN ET AL., 2001, 2004).

Az ezredfordulón Velence és a környező lagúnák műholdas (Hyperion, ALI) és légi (MIVIS) hiperspektrális szenzorokból származó adatok összehasonlítását célzó vizsgálatoknak adott helyszínt (ABRAMS ET AL., 2001). A MIVIS szenzor a későbbiekben több olasz kutatásnak szolgáltatott alapadatot (MARINO ET AL., 2002; BARDUCCI ET AL., 2006; BASSANI ET AL., 2007; PASCUCCI ET AL., 2009). Hasonló összehasonlító elemzéseket végzett CAVALLI ÉS TÁRSAI (2008), melynek eredményeként megállapították, hogy a 30 méteres térbeli felbontás (ETM+, ALI, Hyperion) – objektum-alapú és hagyományos osztályozó eljárásokban alkalmazva – csak a főbb városi felszínborítási kategóriák elkülönítését teszi lehetővé. Érdekes alkalmazásként BARDUCCI ÉS TÁRSAI (2003, 2006) a városi fényszennyezést vizsgálták éjszakai MIVIS felvételek alapján.

BEN-DOR ÉS TÁRSAI (2001) a városi hőszigetet indirekt módszerrel vizsgálta: a közvetlen felszín illetve léghőmérséklet mérések helyett a felszínborítást térképezte DAIS 7915 adatok alapján. A spektrális információkon alapuló térképezéssel – a hagyományos módszerekhez képest – többletinformációk nyerhetők. A város hőmérsékleti viszonyai tehát térképezhetők és modellezhetők hiperspektrális adatok felhasználásával is. XU ÉS TÁRSAI (2008) a hagyományos in-situ mérések helyett – melyek a heterogén városi környezetben csak egy-egy pontszerű adattal szolgálnak – OMIS légi felvételeket és meteorológiai adatokat használtak a felszínborítás és a turbulens érezhető hőáramlás térbeli változásának térképezésére.

A városi felszín pontos térképezésére leginkább a – megfelelő térbeli felbontású – légi hiperspektrális szenzorok adatai alkalmasak. Emellett azonban találunk példákat műholdas felvételek alkalmazására is. A NASA EO-1 Hyperion szenzorának – 30 méteres – adatát használta fel BOKOYE ÉS DIONNE (2004) Montréal belvárosának elemzésére. Hyperion és ETM+ felvételek alapján vízzáró felszínek osztályozását végezte FALCONE ÉS GOMEZ (2005) 88%-os és 59%-os pontossággal. Hasonló kutatásukban WENG ÉS TÁRSAI (2008) közepes térbeli felbontású ALI és Hyperion műholdas szenzorok alkalmasságát vizsgálták. SMA módszerrel vegetáció és talaj, illetve magas és alacsony albedós frakciókat különítettek el. A hiperspektrális Hyperion adatok használata egyedül az alacsony albedós felszínek azonosításában jelentett előnyt, melyet a közepes IR sávok információtartalma eredményezett.

Kaliforniában végzett kiterjedt kutatásokat HEROLD ÉS TÁRSAI (2004), részletesen jellemezve a városi felszín spektrális tulajdonságait. Terepi mérésekből spektrumkönyvtárát állított össze, és vizsgálta az egyes osztályok hasonlóságát. Leírta a legalkalmasabb spektrális tartományokat és értékelte a leggyakrabban alkalmazott multispektrális szenzorokat (Landsat TM, Ikonos). Más kutatásukban a városi aszfalt burkolatú utak és járdák állapotát mérték fel (HEROLD ET AL., 2008). Különböző korú és kopású felszínek spektrumait rögzítették és elemezték.

DELL ACQUA ÉS TÁRSAI (2004) tanulmányukban többszörös klasszifikáció és térbeli elemzések segítségével növelték a DAIS adatok osztályozási pontosságát. BENEDIKTSSON ÉS TÁRSAI (2004, 2005) további kutatásokat végeztek a nagy térbeli felbontású hiperspektrális adatokkal (PALMASON ET AL., 2005). A térbeli információk kinyerésére a számított főkomponensekből morfológiai profilokat vezettek le, majd ezeket együttesen osztályozták neurális háló segítségével. A spektrális információkat maximum likelihood és nem-parametrikus súlyozott objektum kinyeréssel (NWFE) dolgozták fel. A módszert később továbbfejlesztették az eredeti – spektrális – adatok és a morfológiai információk fúziójával (PALMASON ET AL., 2006). Szintén a matematikai morfológia elvei alapján AVIRIS és DAIS

7915 adatokon alkalmazott PLAZA ÉS TÁRSAI (2005) morfológiai szűréseket és osztályozást. Ezzel az adathalmaz egymást kiegészítő térbeli és spektrális információtartalmát egyszerre vették figyelembe, kiküszöbölve azok egyenként jelentkező problémáit.

Nemzetközi szinten is jegyzett magyar kutatások folytak városi környezetben DAIS 7915 felvételek alapján. JUNG ÉS TÁRSAI (2005) a városi növényzetet ért stressz hatását vegetációs indexekkel mutatta ki. A növényzeti indexeket termális adatokkal összevetve sikerült városi hősziget intenzitást és horizontális felszínhőmérsékleti gradienst is számítaniuk (JUNG ET AL., 2007). Az út menti fás vegetáció klorofill tartalmát LIU ÉS TÁRSAI (2005) terepi spektrométerekkel vizsgálták. Műholdas, Hyperion adatok alapján szintén a növényzetet ért stressz hatást osztályozta WANG ÉS TÁRSAI (2007). WANIA ÉS WEBER (2007) a városi vegetációt CASI felvételeket felhasználva, SAM osztályozással térképezte Strassburg-ban. VOSS ÉS SUGUMARAN (2008) az évszakok hatását vizsgálta a városi fafajok objektumorientált klasszifikációjára, nyári és őszi AISA felvételek alapján. A két klasszifikáció pontossága között nem mutatkozott jelentős eltérés (57 ill. 56%), a LIDAR magassági információk azonban jelentősen növelték az osztályozások megbízhatóságát (+19%). AISA radiancia – értékek és a levélborítási index (LAI) közti összefüggéseket vizsgálta JENSEN ÉS TÁRSAI (2009). A többszörös regressziós modellek 0.27-0.73 közötti R^2 kapcsolatot mutattak. Eredményeik alapján az index legjobban a 777 és 673 nm-es sávok radianciájának különbségével korrelál.

SCHIEFER ÉS TÁRSAI (2006) egy érdekes hibahatás kiküszöbölésére fejlesztettek ki empirikus megoldást. A felvételeken megfigyelhető változó fényesség (brightness gradient) akkor jelentkezik legerősebben, ha a repülés tengelye párhuzamos a Nap-célpont-nézőpont síkra. Mindez különösen nehezen korrigálható a térbeli és spektrális értelemben is komplex városi környezetben.

A hagyományos osztályozási algoritmusok tisztán spektrális jellemzők alapján dolgoznak, ami a városi környezetben – az összetett geometria és a térbeli információk jelentősége miatt – nagy hátrányt jelent. FAUVEL ÉS TÁRSAI (2006, 2008) kétlépcsős döntési rendszerű eljárásában (decision fusion) egyesítette a térbeli információ kinyerő megoldásokat – melyek nem veszik figyelembe a teljes spektrális kiterjedést – a pixelalapú osztályozással (Multiple Classifiers System). Az így kapott eredmények jobbak lettek, mintha az algoritmusokat külön-külön alkalmazták volna. Ezzel sikerült összefűzni a szerkezeti és spektrális információkat (BENEDIKTSSON ET AL., 2007). Szintén FAUVEL ÉS TÁRSAI (2009) a dimenziócsökkentést hagyományos főkomponens analízis helyett kernel PCA-val végezte el, majd ez alapján számított morfológiai profilokat. A módszerrel az osztályozások pontosságát 79%-ról 96%-ra sikerült növelni.

BASSANI ÉS TÁRSAI (2007) részletesen vizsgálták a tetőcserepek állapotát, amihez labor, terepi és légi (MIVIS) felvételezési adatokat használtak fel. Mérésekkel leírták a főbb ásványi összetevőket, az optikai tulajdonságokat és az egyes típusok megoszlását is (PASCUCCI ET AL., 2007).

A hiperspektrális képfeldolgozásban egyre elterjedtebb előfeldolgozási lépéssé vált a szegmentálás. Ennek a spektrális információtartalomra gyakorolt hatásait vizsgálta VAN DER LINDEN ÉS TÁRSAI (2007). Megállapították, hogy a szegmentáció – a növekvő szegmens méretekkel – csökkenti az osztályozás pontosságát. A legjobb eredményt a többszintű (multi-level) klasszifikáció során a különböző típusú struktúráknál más-más szegmentációs szintnél kaptak. Összességében a szegmens nélküli osztályozásokhoz hasonló eredményeket csak a homogénebb foltokkal jellemezhető osztályoknál tapasztaltak.

HEIDEN ÉS TÁRSAI (2007) több mint 21.000, német városokban rögzített terepi és képi spektrumot dolgozott fel. Olyan robosztus elemeket kerestek a spektrumgörbéken, melyek – kiküszöbölve az osztályok közötti átfedéseket és az osztályon belüli változatosságot – jól használhatók az anyagok elkülönítésére. Szintén potsdami kutatók (BOCHOW ET AL., 2008) olyan objektumalapú modelleket készítettek, melyek segítségével nagy pontossággal (88%) elkülöníthetők a városi biotópok.

A nagy számítási kapacitást igénylő, sokdimenziós adathalmazok hatékony feldolgozását többen is mesterséges neurális hálózatok segítségével valósították meg (PLAZA ET AL., 2008; DUCA ET AL., 2008).

FRANKE ÉS TÁRSAI (2009) a spektrális szétkeverés egy speciális módszerét alkalmazta HyMap adatokon. A MESMA (Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis) módszer különösen hasznosnak bizonyult a spektrálisan sokszínű városi környezetben, ugyanis lehetővé tette a végállású tagok számának és típusainak pixel-alapú változtatását. Az eljárás 4 különböző hierarchiaszinten futatták, melyek közül a legegyszerűbb csak 2 osztályt tartalmazott (vízzáró és áteresztő), a legösszetettebb azonban már 20 felszíni anyagot és növényfajt. Az alacsonyabb szintű és legpontosabban lehatárolható osztályok térbeli korlátozó feltételként szolgáltak a komplexebb, magasabb szintű osztályoknak, csökkentve ezzel a spektrális bizonytalanságok hatását. Az összesen 1521 elemű spektrumkönyvtárat 3 endmember-kinyerő eljárással (Endmember Average RMS, Minimum Average Spectral Angle, Count Based Endmember Selection) töltötték fel, majd hierarchiaszintenként 2, 3 vagy 4 endmembert tartalmazó modellel végezték a spektrális szétkeverést. A legalacsonyabb hierarchia szinten 97,2%-os pontosságot sikerült elérniük a vízzáró és vízáteresztő felszínek esetében; 81,7%-ot a fa, fű, talaj, folyó, tó/medence, út és tető/épület osztályoknál; valamint 79,5%-ot az legmagasabb szintű 20 kategória osztályozásában.

VAN DER LINDEN ÉS HOSTER (2009) két gyakori problémára hívták fel a figyelmet és elemezték azok hatásait a klasszifikációra. Városi környezetben – különösen a légi távérzékelésben gyakori nagy látószögek esetén – az épületek jelentős kidőlésével kell számolni. Ez problémássá teszi az épületek és a környező felszínek pontos elkülönítését. A hibaforrás az út menti fák lombkoronájának kitakaró hatása is. Kutatásukban kvantitatív módon elemezték az egyes osztályozási hibák forrásait. Nagy látószögek esetében a kidőlő épületek akár 16%-kal is növelték a hibákat a nadír helyzethez viszonyítva, míg az utcák több mint 30%-a került növényzeti osztályba. Mivel mindkét hibahatás sok tényező függvénye és igen nagy szabálytalanságot mutat, tapasztalati korrekciójuk nem lehetséges. Véggkövetkeztetésükben rámutattak, hogy a távérzékelte adatok pontosságának és alkalmasságának értékelésekor minden képfeldolgozási lépést figyelembe kell venni.

HUANG ÉS ZHANG (2009) ROSIS felvételek felhasználásával hasonlított össze különböző térbeli információkinyerő eljárásokat (Differential Morphological Profiles, Pixel Shape Index, Fractal Net Evolution Approach, Mean Shift-based Multiscale Method). Az így azonosított térbeli objektumokat azután SVM módszerrel osztályozták. Eredményeik alapján megállapították, hogy a térbeli eljárásokkal hatékonyan egészíthető ki a spektrális tartalom.

A hiperspektrális adatokat gyakran más adattípusokkal kombinálták (data fusion), így csökkentve korlátaikat és bizonytalanságaikat, illetve kihasználva mindegyikük előnyös tulajdonságait. HEPNER ÉS TÁRSAI (1998) AVIRIS és IFSAR radar felvételeket együttesen használt városi felszínek térképezésére. A radar adatok biztosították a részletes, 3D-s geometriát, az AVIRIS adatok alapján pedig a különböző típusú felszíneket tudták lehatárolni. Hasonló kutatásokat végzett GAMBA ÉS HOUSHMAND (2001) is. Magassági modell adatait kombinálta hiperspektrális felvételekkel MADHOK ÉS LANDGREBE (1999) épületek lehatárolása céljából. A DEM-ből gradiens-alapú eljárással kinyert határvonalakat spektrális osztályozással pontosították. A különböző anyagú, állapotú és geometriájú tetők megkülönböztetése – a spektrálisan sokszor hasonló utca szinten található felszínek miatt is – problémákba ütközött. A két adattípus fúziója összességében pontosabb lehatárolást tett lehetővé. A hiperspektrális adatok sokszor nem megfelelő térbeli felbontását – főként műholdas (pl. Hyperion) szenzorok esetén – nagyfelbontású adatokkal (pl. Ikonos) javítják (LIEW ET AL., 2003). GREIWE ÉS TÁRSAI (2004) szegmens alapú endmember kijelölést alkalmazott RGB és hiperspektrális légifelvételeken. LEMP ÉS WEIDNER (2005) lézeres adatokból származó geometriai jellemzőkkel korlátozta a – hiperspektrális felvételekből kinyert – lehetséges tetőtípus osztályokat. HyMAP hiperspektrális és polarimetrikus SAR adatok fúziójából térképezte a városi felszín változásait BORGHYS ÉS TÁRSAI (2007). LIDAR

magassági, Quickbird multispektrális és AISA hiperspektrális adatok fúziójával azonosított városi fafajokat SUGUMARAN ÉS VOSS (2007). A magassági információk minden esetben növelték az osztályozás pontosságát (12-24%-kal), különösen a kisméretű objektumokat tartalmazó (facsemeték, bozót) osztályokban.

A következőkben a képalkotó spektrometria hazai történetét és legfontosabb alkalmazásait mutatom be. Mivel városi példákból még nem sokat találni, ezért röviden áttekintem az egyéb felhasználási területeket is, melyek közül a geológiai és mezőgazdasági témák vannak túlsúlyban.

A hazai hiperspektrális légi távérzékelés – az 1990-es évek legelején történt próbálkozásokat követően – 2002-ben indult (KARDEVÁN ET AL., 2003). A DLR által kivitelezett HYSSENS 2002 projekt keretében hazánk 3 különböző mintaterületén történt felvételezés DAIS szenzorral. A cél a Mátrában felhagyott bányák – Recsk és Gyöngyösoroszi - geológiai és nehézfém szennyezés térképezése, a Sajó-völgyben az ártéri szennyezések vizsgálata, a Debreceni Tudományegyetem látóképi mintagazdaságában és a Tedej körzetében pedig mezőgazdasági és talajtani felhasználású adatgyűjtés volt (HARGITAI ET AL., 2006). Ezzel olyan alapadatok jöttek létre, melyek lehetőséget teremtettek a hazai kutatók számára is az új típusú adat feldolgozásának és alkalmazási lehetőségeinek megismerésére. A projekt tapasztalatai alapján indultak meg a műszervásárlások - légi és terepi spektrométerek –, illetve jelentek meg újabb felhasználási területek (pl. városi környezet, élőhely térképezés) és célcsoportok.

2006 előtt a tudományos publikációk a HYSSENS felvételezés adataira épültek. Ezek egy része az adatgyűjtést és a feldolgozást mutatta be (KARDEVÁN ET AL., 2003, HARGITAI ET AL., 2006), mások konkrét alkalmazásokat tárgyaltak. DAIS adatok alapján a különböző sávkombinációk és spektrális indexek felhasználási lehetőségeiről értekezett BURAI ÉS PECHMANN (2004). BURAI (2006) a földhasználat térképezésre és a növényzeti monitoring lehetőségeire adott példát Landsat ETM+ és DAIS 7915 felvételeket felhasználva. NAGY ÉS TAMÁS (2008) a Gyöngyösoroszi iszaptározó Pb, Zn és Fe tartalmú ásványainak térbeli eloszlását vizsgálta. JUNG ÉS TÁRSAI (2005, 2007) a Mátra déli lábánál készült felvételeket Gyöngyös városi területén – első hazai városi alkalmazásként – a növényzet stressz hatásokra adott válaszána vizsgálatára használta fel. A nagyszámú és keskeny felvételi sáv lehetővé tette a különböző, speciális vegetációs indexek számítását, a szinte folytonos DAIS spektrum pedig jó lehetőséget biztosított a görbék lefutásának (pl. meredekség, lokális minimumok) elemzésére is, melyek a stressz hatások indikátorai lehetnek. További kutatásaikban a szenzor hőtartományban rögzített adatai alapján a városi (mikro)klíma és a növényzet állapota közti összefüggéseket is vizsgálták (JUNG ET AL., 2007).

2006-ban a Földművelési és Vidékfejlesztési Minisztérium (FVM) Mezőgazdasági Gépesítési Intézete (MGI) és a Debreceni Egyetem Víz- és Környezetgazdálkodási Tanszéke Európai Unió támogatással beszerzett egy AISA Dual légi hiperspektrális szenzort. Innentől – a kezdeti kalibrációs és adatfeldolgozásbeli problémákat megoldva – folyamatosan egyre szélesebb körben alkalmazzák hazánkban is a hiperspektrális technológiát. Az első próbapépülések egyikén történt meg a – jelent kutatásban is tárgyalt – Szeged város teljes területét lefedő felvételezés. A publikációk kezdetbe elsősorban technikai jellegű – kalibrációs - témákat tárgyaltak (TAMÁS ET AL., 2009), melyek mellett fokozatosan megjelentek a konkrét alkalmazások (BURAI ET AL., 2008A, 2009; TAMÁS ET AL., 2009) és az adatfeldolgozás módszertanával foglalkozó publikációk is (BAKOS, 2008; KOZMA-BOGNÁR ÉS BERKE, 2010). A mezőgazdasági alkalmazások sora talán a leghosszabb, kezdve a parlagfű térképezéstől (BURAI ET AL., 2009) a precíziós mezőgazdaságon (MILICS ÉS NEMÉNYI, 2007) át a fajszintű (TAMÁS ET AL., 2010) és a növényzeti stressz (BURAI ET AL., 2008B) vizsgálatokig. A környezetvédelem témakörében az élőhely monitoringban (NEIDERT ET AL., 2007) és a bányászati tevékenységek által érintett területeken alkalmaztak hiperspektrális

légifelvételeket (NAGY ÉS TAMÁS, 2008). A 2010-es vörösiszap katasztrófát követő kármentesítési munkálatok támogatásában is jelentős szerepe volt ezeknek a felvételezéseknek (BERKE ET AL., 2011; LÉNÁRT ET AL., 2011). A városi területek vizsgálatára – a korábbi gyöngyösi és a szegedi elemzések mellett – a Nyugat-Magyarországi Egyetem szolgáltat további példát (VISINÉ ÉS KIRÁLY, 2011). Végezetül érdemes megemlíteni az FVM-MGI Hungarian Hyperspectral Working Group (HHWG) kezdeményezést, amely a légi, földi és laboratóriumi vizsgálatok összefogása, illetve hiperspektrális szolgáltatások indítása mellett a nemzetközi kapcsolatok és az egyetemi képzések fejlesztését tűzte ki céljául (TOLNER, 2011).

2.4. Távérzékelte hőmérsékleti információk gyűjtése a városi felszínről

Kutatásom során a nagy térbeli és spektrális felbontású légifelvételek mellett sikerült a városi felszín hőmérsékleti viszonyairól is információkat gyűjteni, melyhez egy külön szenzort – hőkamerát – alkalmaztam. Ezzel – a hazánkban már bevett gyakorlatnak számító - felszíni felmérés légi távérzékeléses adatokkal egészülhetett ki (RAKONCZAI ET AL., 2009; UNGER ET AL., 2010A).

A távérzékelte felvételeken alapuló városklíma kutatásokról VOOGT ÉS OKE (2003) közölt részletes összefoglalót. A városi felszínek hőmérsékleti viszonyainak elemzésére a Landsat TM és a NOAA AVHRR szenzor hőtartományú sávja(i)ban már az 1980-as évek óta szolgáltat adatokat. ROTH ÉS TÁRSAI (1989) a városi hősziget intenzitást (UHI) vizsgálva a felszín és a léghőmérséklet között keresett kapcsolatot AVHRR felvételek alapján. NICOL (1996) Szingapúr felhőkarcolókkal teletűzdelt városának felszínhőmérséklete és az épületek geometriája közötti összefüggéseket kereste Landsat TM termális adatainak felhasználásával. Az év különböző időszakában készített felvételek alapján – az eltérő napmagasságok miatt – más-más hőmérsékleti mintázatok alakultak ki az épületek és a felszínek következtében. STREUTKER (2002) Houston-ban végzett kutatásaival olyan módszert dolgozott ki, amivel műholdas adatok alapján, in-situ mérések felhasználása nélkül meghatározható a hősziget intenzitása és térbeli kiterjedése. WENG (2003) szintén TM adatokból kiindulva, több kijelölt útvonal mentén számított fraktál dimenzió értékeket elemezte, és megállapította, hogy azok a tavaszi képeken veszik fel a legalacsonyabb, a nyári felvételeken a legmagasabb értékeket. A hazai kutatások közül az ASTER és MODIS szenzorok termális adataira épülő hősziget vizsgálatokat (PONGRÁCZ ET AL. 2010) kell kiemelni.

A következőkben csak a légi platformról – repülőgépről vagy helikopterről – végzett felvételezések előzményeit tekintem át röviden.

GOLDREICH (1985) Johannesburg felett, BÄRRING ÉS TÁRSAI (1985) Stockholm-ban készített repülőgépes termális felvételeket a hősziget vizsgálata céljából. Utóbbi figyelembe vette a felszíni geometria – szűk utcák – módosító hatásait is. ELIASSON (1992) Göteborg-ban hasonlította össze a terepi méréssel gyűjtött léghőmérséklet és a repülőgépes felvételezésből származó felszínhőmérsékleteket. BEN-DOR ÉS SAARONI (1997) helikopterrel telepített szenzort használt Tel-Aviv-ban. LO ÉS TÁRSAI (1997) a különböző felszínborítások nappali és éjszakai hőmérsékletének jellegzetességeit elemezte 5 méteres felbontású ATLAS (*Advanced Thermal and Land Applications Sensor*) légifelvételek alapján. VOOGT ÉS OKE (1998) nappali, helikopteres felmérésével a felszíni geometria és hőmérséklet kapcsolatát kutatta. QUATTROCHI ÉS RIDD (1998) városi vegetációs vizsgálataikhoz termális légi szkennelvel nyert – 5 m felbontású – adatokat használt fel. A 2 tágabbban értelmezett és 10 speciálisabb növényzeti osztály termális kisugárzását nappali és éjszakai viszonyok között elemezve megállapították, hogy azok szoros összefüggésben vannak a növényzet biofizikai jellemzőivel, illetve a – főként fás – vegetáció jelentős szerepet játszik a városi hőmérsékleti többlet város környéki légkörbe terítésével.

3. MINTATERÜLET BEMUTATÁSA – SZEGED

A következőkben a kutatás mintaterületeit adó, Szeged Megyei Jogú várost mutatom be röviden, várostörténeti, városszerkezeti és területhasználati szempontok alapján. A városszerkezetre legnagyobb hatást gyakorolt történelmi folyamatok és események vázlatos áttekintése Szeged város integrált városfejlesztési stratégiáján alapul (2008).

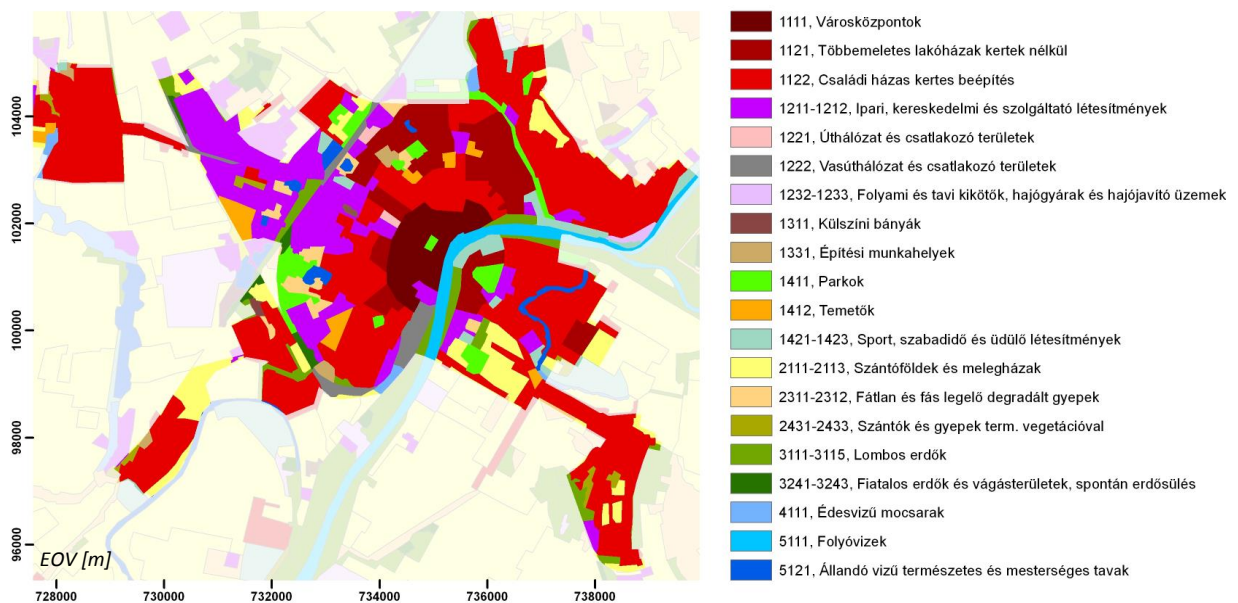
3.1. Rövid történeti áttekintés

Szeged hazánk 3. legnépesebb városa (2012. január 1-én 170 052 fő lakónépesség - KSH, 2012). Csongrád megye székhelye, a Dél-alföldi régió központja, de különösen oktatási és egészségügy szolgáltatásainak vonzáskörzete ezt jóval meghaladja. Közigazgatási területe 281 km². Városi rangját 1246-ban IV. Béla adományozta, ami mellé 1498-ban a szabad királyi városok jogait is megkapta. A kezdetben döntően mezőgazdasági és kereskedelmi funkciók a 19. századtól a gyors iparosodással tovább bővültek. A város történetének fordulópontjára 1879. március 12-én ért, amikor a Tisza a pecsori töltést átszakítva elpusztította a település döntő részét. A Lechner Lajos tervei alapján megindult újjáépítés eredményeképpen a jelentős feltöltés, a lakott részeket védő körtöltés és körutas-sugárutas úthálózat a korábbtól eltérő struktúrát kölcsönzött a városnak. A 20. század új funkciókkal gazdagította a települést, mely a térszerkezetben is változásokat hozott: az egyetemi épületek és a nagy kiterjedésű ipari létesítmények építése, illetve a lakótelepekre zsúfolódó és a külső, falusias kerületekbe települő népesség jellemezte ezt az időszakot. 1973-ban Szegedhez csatolták Gyálarét, Kiskundorozsma, Szőreg, Tápé és - az 1994-ben ismét önállósult - Algyő településeket. Az 1970-80-as évtizedekben a legnagyobb városkép formáló hatása a lakótelep építéseknek és az új Tisza-híd átadásának volt. Az ezredfordulótól város rehabilitációs projektek sora valósult meg a városban, melyek szintén jelentős hatással voltak a felszínborításra (SZEGED MJV INTEGRÁLT VÁROSFEJLESZTÉSI STRATÉGIÁJA, 2008).

3.2. A felszínborítás és területhasználat általános jellemzői

Jelenleg két olyan nemzetközi, vektoros adatbázis áll rendelkezésünkre, mely alapján Szeged város beépítettségéről és területhasználatáról viszonylag részletes képet kaphatunk. Az Európai Unió által az 1980-as években indított CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover (CLC) program az összehangolt uniós környezeti politika támogatására jött létre, 1:100 000-es méretarányú vektoros fedvényt eredményezve. A Landsat TM adatokon alapuló feldolgozás Magyarországon 1993-96. között készült el. Az általam felhasznált 1:50 000-es CLC50³ fedvények Szeged környékén - SPOT 4 felvételek alapján - az 1998-as állapotokat tükrözik (3.1. ábra). A legkisebb térképezett objektum mérete 4 ha. A 4 szintű hierarchikus osztálystruktúrában – belterületen – keveredve jelennek meg a morfológia (pl. többszintes és egyszintes épületek) és a funkciók (pl. városközpont, ipari és szolgáltató területek, közlekedési infrastruktúra) alapján definiált kategóriák. A teljes városra számított statisztikák alapján elmondható, hogy a területek 44,5%-a kertes családi házas zónába esik, melyet kiterjedését tekintve az ipari, szolgáltató körzetek (13,8%) és a lakótelepek (9%) követnek. A zöldterületek – kiegészülve mezőgazdasági művelés alatt álló térszínekkel – összesen 18,6 %-os részesedéssel bírnak. A város határain belül 205,5 ha (4,3%) vízfelület található a felmérés időpontjában. A CLC50 kategóriák részletes eloszlása az 3.1. ábrán és az 1/A mellékletben tanulmányozható.

³ http://www.fomi.hu/corine/clc50_index.html



3.1. ÁBRA CLC50 kategóriák megoszlása Szeged belterületén (1998)

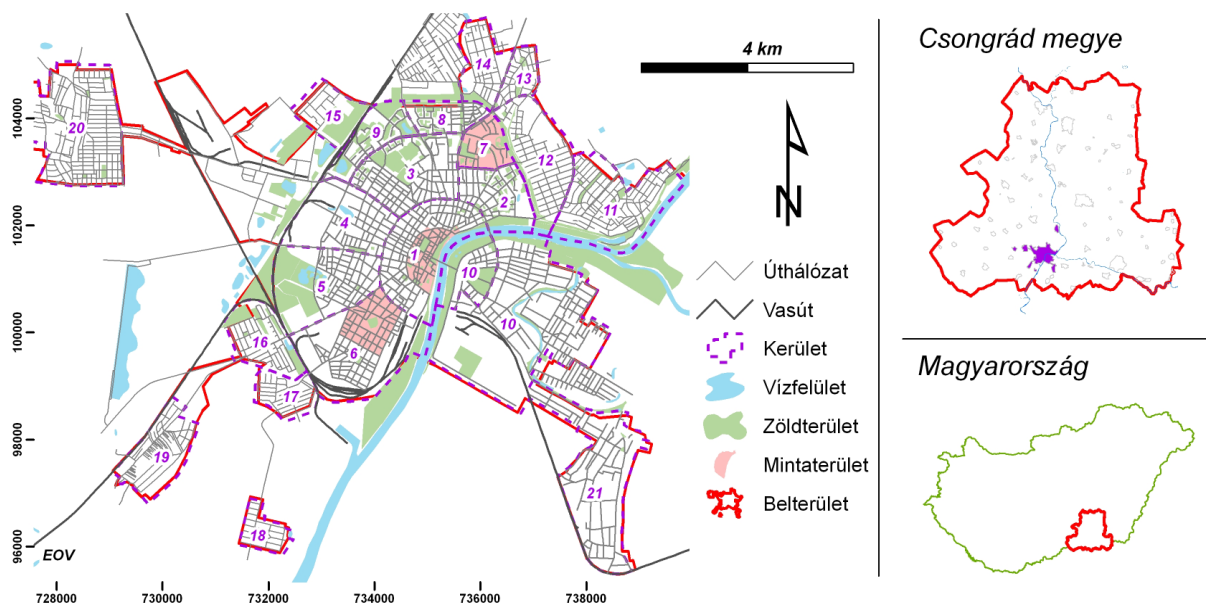
Az Európai Unió Urban Atlas programja az GMES (Global Monitoring for Environment and Security) kezdeményezés keretében Európa 305 legnépesebb városára szolgáltat részletes területhasználati térképet (LUDLOW ÉS STEINBORN, 2009). Az adatbázis a várostervezési feladatok támogatása mellett lehetőséget teremt a nagyvárosok beépítettségének összehasonlítására. Legfontosabb alapadatként nagy térbeli felbontású (~2,5 m), 2006-os (±1 év) műholdképeket, topográfiai térképeket és úthálózati rétegeket használtak fel. Az adatok területi felbontása (Minimum Mapping Unit – MMU) a beépített kategóriákban 0,25 ha (1/B melléklet). A Szeged belterületére számított statisztikák alapján a legnagyobb kiterjedésben az 50-80% közötti talaj borítottsággal jellemezhető *nem-egybefüggő, sűrű városi beépítés* jelenik meg (~30%). A terület közel fele közepesen sűrűn vagy sűrűn beépített (11100-11300). Az ipari, szolgáltató funkció térbeli kiterjedése a CLC50 felmérés óta néhány százalékkal növekedett (16,4%). A közlekedési infrastruktúra jelentős aránya (7,2%) a pontosabb térképezési módszertan eredménye. A városi zöldterületek alig növekedtek (18,8%) (3.1. táblázat).

3.1. TÁBLÁZAT Urban Atlas kategóriák megoszlása Szeged belterületén (2006)

	kód	terület [m2]	[%]
Egybefüggő városi beépítés (S.L. > 80%)	11100	7194373	15.23
Nem-egybefüggő, sűrű városi beépítés (S.L. : 50% - 80%)	11210	14102053	29.85
Nem-egybefüggő, közepesen sűrű városi beépítés (S.L. : 30% - 50%)	11220	2148932	4.55
Nem-egybefüggő, alacsony sűrűségű városi beépítés (S.L. : 10% - 30%)	11230	102199	0.22
Nem-egybefüggő, nagyon alacsony sűrűségű városi beépítés (S.L. < 10%)	11240	20934	0.04
Elkülönülő építmények	11300	26938	0.06
Ipari, kereskedelmi, közösségi, katonai és magánterületek	12100	7753842	16.41
Egyéb utak és kapcsolódó területek	12220	3390498	7.18
Vasút és kapcsolódó területek	12230	564188	1.19
Kikötők	12300	54168	0.11
Bányászati és anyagfelhalmozási területek	13100	41766	0.09
Építési területek	13300	139749	0.30
Jelenleg nem használt területek	13400	1355960	2.87
Városi zöldterületek	14100	4246279	8.99
Sport és szórakoztató létesítmények	14200	457711	0.97
Mezőgazdasági területek	20000	3575629	7.57
Erdő és félig természetes területek	30000	623651	1.32
Vízfelületek	50000	1444945	3.06
Összesen		47243816	100.00

3.3. Városrészek – mintaterületek

A városrészek funkcionális lehatárolásában a fent részletezett történeti és társadalmi-gazdasági folyamatok játszottak szerepet. Az 3.2. ábrán látható 21 körzetet különítettem el a városban. Ezek közül 9 az ún. „Körtöltésen” belül helyezkedik el (1-9), 4 pedig korábban önálló településként funkcionált (11, 18, 20, 21). A városrészek a beépítés típusa – sűrűsége, morfológiája – alapján is jól elkülönülnek egymástól. Jelen kutatás ezek közül 3-at érint: Tarján (7) teljes területét, a Belváros (1) Tisza Lajos krt. és a Tisza által körbezárt részét, illetve az Alsóváros Nagykörúthoz közelebb eső felét, amit a Bécsi krt. – Petőfi Sándor sgt. – Alsó-Nyomási sor – Nyíl u. – Hattyas sor – Bem u. – Boldogasszony sgt. határol.



3.2. ÁBRA Szeged belterületének KSH körzeteken alapuló felosztása és a mintaterületek elhelyezkedése

A következőkben általános képet szeretnék adni a kiválasztott mintaterületekről. A kiválasztásnál az adatok elérhetősége mellett elsődleges szempont volt, hogy minél többféle városi beépítési típust reprezentáljanak. A részletes, Corine Land Cover 1:50000-es méretarányú felszínborítási és az Urban Atlas területhasználati adatbázis adatain alapuló elemzésre a későbbiekben (5.8. fejezet) kerül sor.

Alsóváros

Az Alsóvárosban kijelölt mintaterület kb. 90 ha kiterjedésű. Legnagyobb részét kertesi családi házas beépítés jellemzi. A körúthoz közelebb eső blokkok közül néhányban 5 szintes tömbházakat is találhatunk. Nagyobb területet foglalnak el oktatási intézmények, egy közép- és egy általános iskola, melyekhez sportpályák is kapcsolódnak. A terület központi részén – kiterjedt, 4,5 ha-os zöldfelülettel körülölelve – helyezkedik el a Mátyás-téri ferences templom és kolostor. Az utcahálózat nagyrészt szabályos, az egymást merőlegesen keresztező utcák dominálnak (3.3. ábra).

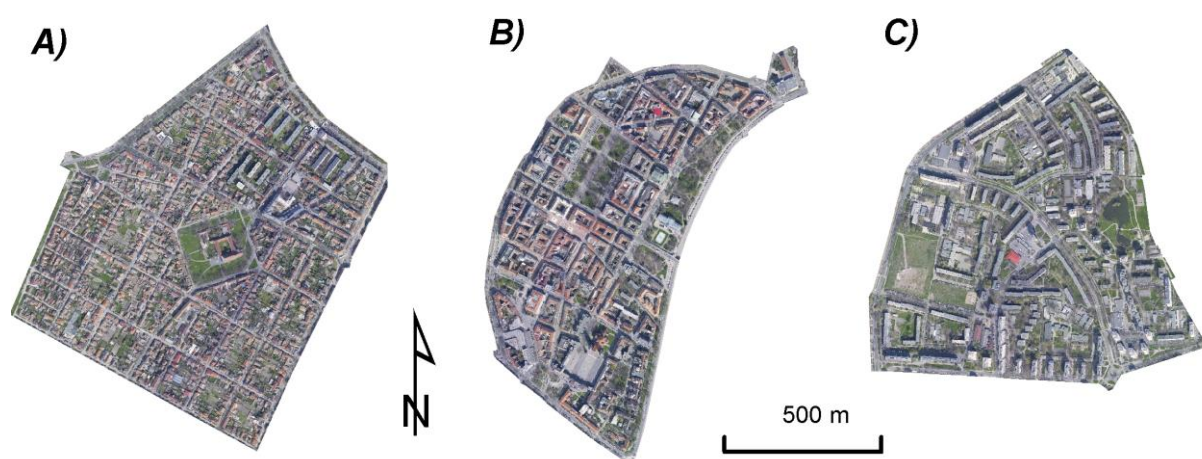
Belváros

A Belváros kiskörúton belüli része közel 70 ha. A többszintes épületekkel sűrűn beépített területet két nagyobb zöldfelület is megtöri. A Széchenyi-tér (3,8 ha) és a Tiszaparton végighúzódó Stefánia (3,3 ha) mellett a Klinikák területén is jelentős vegetációval találkozhatunk. Az alsóvárosinál sűrűbb utcahálózat és a széles körút, illetve rakparti terület azonban a burkolt felületek arányát növeli. Funkcióját tekintve a lakó- és szolgáltató blokkok

dominálnak, mely utóbbiak közül a közigazgatási, oktatási és egészségügyi intézmények, a bankok és irodaházak a legjelentősebbek (3.3. ábra).

Tarján

Tarján a város egyik legrégebbi lakótelepe, melynek építése 1965-1972 között történt. Területe kb. 78 ha. Nagy részén 5-10 szintes panel blokkok találhatók. Az épületek között kiterjedt parkok és egy közel 0,7 ha-os tó is megfigyelhető. Egy kb. 4 ha-os terület – ami egykor temető volt – évek óta kihasználatlanul, füves térszínként jelenik meg a térképeken. Az úthálózat szabálytalan, a teljes városra jellemző körutas-sugárutas szerkezet részei itt is megfigyelhetők. A széles, nagyobb forgalmú utak mellett gyakoriak az épületek parkolóihoz vezető – sokszor lombkoronával fedett – kis utcák (3.3. ábra).



3.3. ÁBRA A mintaterületek kivágata a 10 cm felbontású RGB ortofotó mozaikból
(A – Alsóváros, B – Belváros, C – Tarján)

4. ADATGYŰJTÉS – ELŐFELDOLGOZÁS

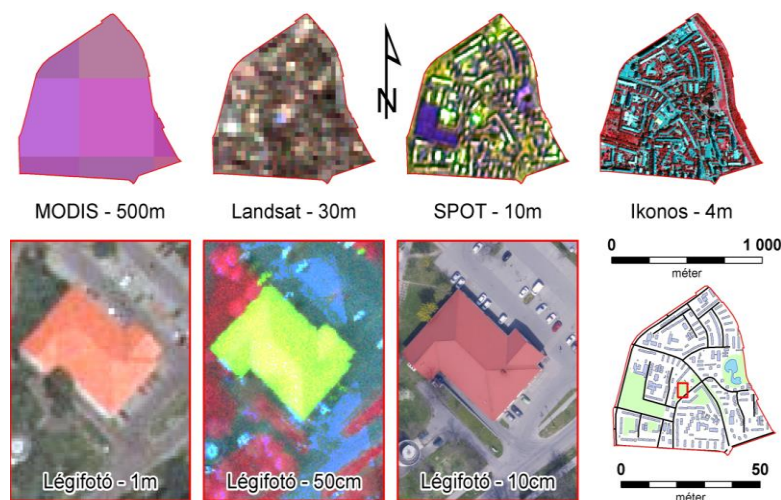
A 4. fejezetben – az 1. kutatási célnak megfelelően – a felhasznált adatok előállításának és előfeldolgozásának folyamatát mutatom be. A távérzékelte adatok legfontosabb tulajdonságai mellett részletesen kitérek az alkalmazott felvételező rendszer felépítésére és a légifelvételzés menetére, valamint taglalom az osztályozásra kész adatállományok előkészítésének lépéseit.

4.1. Távérzékelte adatok jellemzői – felbontások

A légi és műholdas platformról készített távérzékelte felvételek felhasználási területeit nagyban befolyásolja azok térbeli, radiometriai, spektrális és időfelbontása. Ezek a tényezők – a technológia aktuális fejlettségi szintjén és a köztük kialakított megfelelő kompromisszum eredményeképpen – együttesen teszik lehetővé a jó minőségű (fényességű, kontrasztú, geometriai és spektrális részletességű), gyakori és költséghatékony adatgyűjtést. A következőkben ezeket a felbontás faktorokat a városi térszínek vizsgálatának szemszögéből mutatom be.

Geometriai vagy térbeli felbontás

A geometriai felbontás megadja az egy *képelem* (pixel) által lefedett felszíni terület *méretét*. Értékét a szenzor belső paraméterei (érzékelők fizikai mérete, kamera fókusztávolsága) és a repülési (keringési) magasság egyértelműen meghatározza. A városok összetett, komplex geometriája a felvételek nagy térbeli felbontását igényli (4.1. ábra). A korai kutatások elsősorban az Egyesült Államok nagy kiterjedésű – és viszonylag egyszerű struktúrájú – városaira koncentráltak, így az akkori műholdas szenzorok néhány 10 méteres térbeli felbontása is elegendőnek bizonyult az elemzésekhez (Landsat, SPOT). Az európai kontinensen – az eltérő történelmi hagyományok, urbanizációs folyamatok hatására – ettől egészen eltérő szerkezetű városok jelentik a kutatási területeket. A jóval idősebb, kompaktabb városközpontok vizsgálatához már nagyobb térbeli felbontás szükséges (SPOT, Ikonos). A fejlődő világ robbanásszerű városnövekedése további, jellegzetes igényeket támasztott, és egyben fejlesztéseket generált a városi távérzékelésben (kisformátumú felvételek) (DONNAY ET AL. 2001).



4.1. ÁBRA Műholdképek (felül) és légifelvételek (alul) térbeli felbontásának szemléltetése a tarjáni mintaterület példáján

Kisformátumú légifelvételzés során a pixelméreten túl a másik fontos geometriai tényező az *egyedi képek* – és az általuk lefedett terület - *kiterjedése*. Ezt az érzékelők mérete és a repülési magasság mellett a szenzorok elé illesztett különböző látószögű objektívekkel befolyásolhatjuk (4.1. táblázat). Nagyobb képek esetében rövidebb repülési idő alatt végezhető el a felvételezés és kisebb számú feldolgozandó kép keletkezik, ami a felvételezési és feldolgozási idő és a költségek optimalizálása során elsőrendű fontossággal bír.

4.1. TÁBLÁZAT Az alkalmazott objektív hatása a kisformátumú légifelvétel geometriai tulajdonságaira

Objektív	Fókusz-távolság [mm]	Repülési magasság [m]	Térbeli felbontás Pixel [m]	Kép-szélesség [m]	Kép-magasság [m]	Képterület [ha]
TOKINA AT-X PRO	17	914	0,26	368	276	10,1
		1524	0,44	614	460	28,1
		2438	0,71	982	736	71,9
		3048	0,88	1228	920	112,4
		3353	0,97	1350	1012	136,0
SIGMA EX DG ASPHERICAL	28	914	0,16	223	167	3,7
		1524	0,27	372	279	10,3
		2438	0,43	596	447	26,5
		3048	0,53	745	558	41,4
		3353	0,59	819	614	50,0

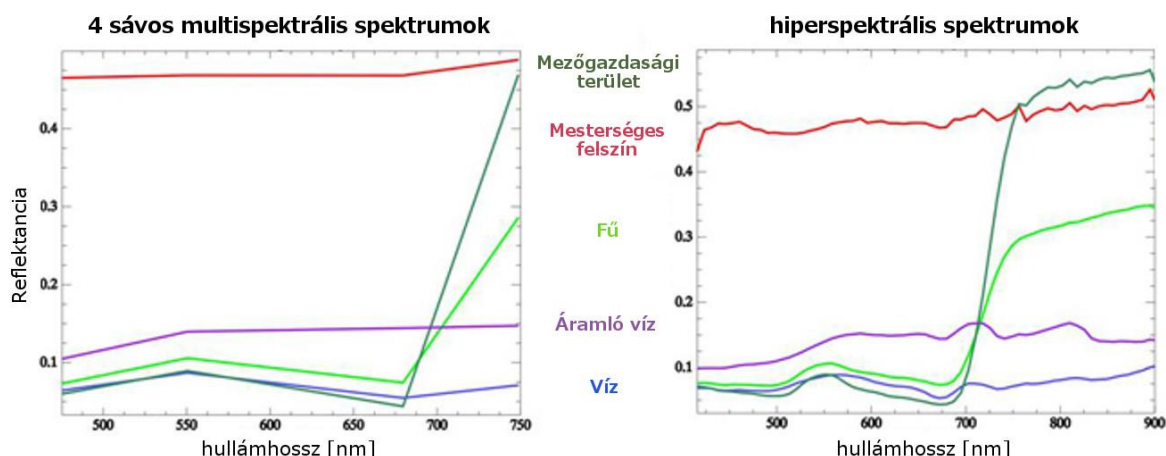
Radiometria felbontás

A radiometriai felbontás megmutatja, hogy mi az a legkisebb intenzitásbeli különbség a detektált sugárzások között, amit az alkalmazott szenzor (vagy film) képes elkülöníteni. A felbontás bit-ben megadott értéke tulajdonképpen a digitális jellé alakítási folyamat során a felhasznált mérési szintek száma. Ily módon a felvételek radiometriai felbontásával párhuzamosan növekszik az eltárolható spektrális információ mennyisége. A napjainkban használt szenzorok sávonként legalább 8 bit felbontással rendelkeznek, azaz 256 különböző intenzitási érték elkülönítésére képesek.

Spektrális felbontás

A távérzékelte felvételek spektrális tulajdonságait a *felvételezési sávok száma* – és elhelyezkedése – valamint a *spektrális sáv szélesség* paraméterekkel jellemezhetjük. Ez alapján különíthetünk el pankromatikus, multispektrális és hiperspektrális szenzorokat és adatokat. A sávok számának növekedésével párhuzamosan csökken az egy-egy csatorna által lefedett hullámhossztartomány szélessége – és így az átlagolás mértéke. Ennek eredményeképpen, amíg a multispektrális felvételekből csak durván átlagolt információkhoz juthatunk az anyagok reflektanciájára vonatkozóan, addig a hiperspektrális adatok közel folytonos spektrumot szolgáltatnak a felvételezési hullámhossztartomány(ok)ban (4.2. ábra).

A városi felszínt felépítő anyagok fizikai-kémiai sokszínűségének térképezéséhez a felvételek megfelelő spektrális felbontása szükséges. A múlt század '80-as éveiben megjelent képkalkotó spektrometria az elmúlt évtizedben a városi alkalmazásokban is egyre nagyobb teret nyert. A néhány nanométer szélességű érzékelési sávok alapján egyszerűbben és pontosabban azonosíthatók az egyes anyagok spektrális jellemzői, így osztályozással sikeresebben elkülöníthetők egymástól a felszínt borító anyagok. Könnyű belátni, hogy a számos anyag kompozíciójából felépülő városi felszín vizsgálatakor ez mekkora előnyt jelent a néhány – széles – sávval rendelkező Landsat TM vagy Ikonos felvétellel szemben (4.2. ábra).



4.2. ÁBRA Multispektrális és hiperspektrális szenzor által rögzített spektrumok
(Forrás: ITRES / Penn State University⁴)

A nagy spektrális felbontás ugyanakkor hátrányokkal is jár. A nagyszámú sáv – sokszor redundanciák által – növeli az adathalmaz dimenzióját, és a nagy térbeli felbontással együtt olyan adatmennyiséget eredményez, ami speciális adattárolási és -feldolgozási eszközöket és módszerek ismeretét követeli meg a felhasználóktól. Az elmúlt évek technológiai fejlődése ezekre a problémákra – fokozatosan – megoldással szolgál.

Időtényező

Az időbeli felbontás szerepe elsősorban a haváriaszerű jelenségek és az urbanizációs folyamat hatására folyamatosan változó felszín monitoringjában mutatkozik meg. Ezen a területen a légi platformon elhelyezett felvételező rendszerek előnyben vannak a műholdas szenzorokkal szemben. A földmegfigyelő műholdak fix keringési pályái – a programozási lehetőségekkel most nem számolva – alapvetően meghatározzák az adott területről egymást követően készíthető felvételek között eltelt időt. A légifelvételezés – az időjárási körülményeket figyelembe véve – igény szerinti időpontban, tervezhetően elvégezhető.

Az időtényezőhöz kapcsolódik a – nem pásztázó szkenneres – légifelvételezésben a két egymást követő kép elkészítése között eltelt idő, azaz a *kameraciklus*. Ennek meghatározásához a repülési terv elkészítése során figyelembe kell venni a repülőgép tényleges haladási sebességét és a szomszédos képek átfedésének mértékét. A nem megfelelően megválasztott kameraciklus eredményeként vagy túl sok felvétel készül – melynek tárolása és feldolgozása lehet problémás – vagy nem lesz elegendő a képek közötti átfedés a későbbi sztereo kiértékelések elvégzéséhez.

Szintén fontos megemlíteni a légifényképezés során alkalmazott *expozíciós időt*. Ennek helyes megválasztásával elkerülhető a *képvándorlás* (bemozdulás), illetve megfelelő fényességű képek készíthetők. Az expozíciós időt az aktuális fényviszonyokhoz igazodva manuálisan, vagy fénymérőt használva automatikusan állíthatjuk.

A felbontások együttes hatása

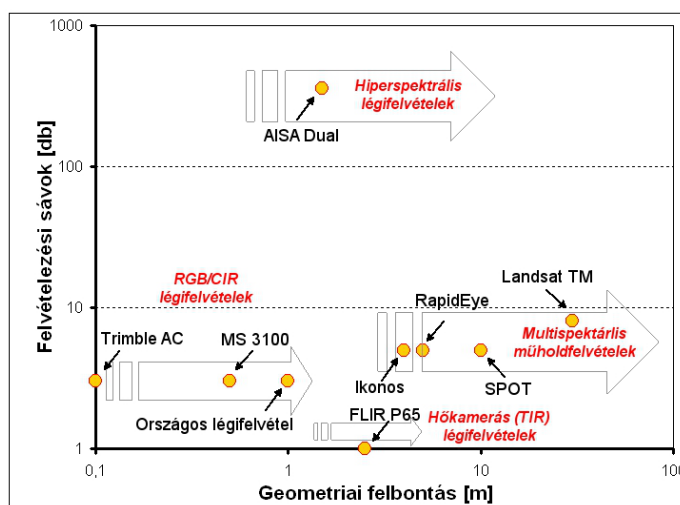
A távérzékeléses adatgyűjtés során az említett felbontás paraméterek egymással szoros kapcsolatban állnak. Ahhoz, hogy a felszín egy darabjáról adott érzékelési tartományban – csatornán – elegendő fénymennyiséget (fotont) tudjunk detektálni, a térbeli felbontást és a spektrális sáv szélességet kell egyensúlyban tartani. Nagyobb térbeli felbontás – azaz kisebb pixelek – esetén csak szélesebb spektrális tartományból érkezik elegendő foton, míg nagyobb képelemeket vizsgálva jobban leszűkíthetők az érzékelési sávok. Emellett a nagyobb spektrális és radiometriai felbontás fejlettebb érzékelőt igényel a felvételező rendszerben, ami

⁴ <https://www.e-education.psu.edu/geog883kls/node/463>

természetesen magasabb költségként jelentkeznek. Az időfelbontás a fix pályán keringő, nem programozható műholdak esetében nem változtatható, légifelvételkor azonban éppen a tetszőlegesen sűríthető, ismétlődő képkészítés vezet növekvő költségekhez.

Kutatásom során különböző légifelvételeket használtam fel a városi felszín térképezéséhez és a változások nyomon követéséhez (4.3. ábra és 2.sz. melléklet). Az alapadatok összegyűjtése során célul tűztem ki a *költséghatékonyság* és a - fentieknek megfelelően - minél *nagyobb* térbeli, spektrális és időbeli *felbontás* közti ésszerű kompromisszum megtalálását.

A különböző felbontású adatgyűjtés következtében a felvételek egy része több térbeli, más részük nagyobb spektrális információtartalom kinyerésére ad lehetőséget. Mindkét esetben megfelelő feldolgozási módszereket kell alkalmazni, melyekkel azonban sokszor elveszítjük a hasznos képi és/vagy spektrális információk egy részét. Erre a problémára kínálnak megoldást a különböző adatokat és feldolgozási módszereket egymással összefűző – fúziós – eljárások (HENITS ET AL., 2011).



4.3 ÁBRA A térbeli és spektrális felbontás összefüggése a városi felszín kutatásában alkalmazott műholdas és légi szenzor példáján

4.2. Légi adatgyűjtés

Ebben az alfejezetben a saját kiépítésű, kisformátumú kamerák hordozására képes légifelvétel platformot és az AISA Dual hiperspektrális képkészítő rendszert mutatom be. A tervezést, navigációt és adattárolást hardver és szoftver oldalról egyaránt részletezem.

4.2.1. Kisgépes kisformátumú felvételező rendszer (SFAP)

4.2.1.1. A kisformátumú felvételezés előnyei és hátrányai

Az SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszékén 2008 tavaszán kezdődött el egy kisformátumú légi felvételező rendszer kiépítése, mely a fejlesztések első fázisában színes-infravörös (CIR, color-infrared) légifelvételek készítésére volt csak alkalmas. A korábbi hőkamerás kutatási tapasztalatok (TEKER – Termális Képkészítő és Elemző Rendszer) (MUCSI, 2001) alapján célul tűztem ki egy olyan rendszer létrehozását, amely – kezdetben a már meglévő infrastruktúrára és kapcsolatokra épülve – költséghatékonyan képes támogatni a környezeti monitoringot igénylő döntéshozást. A kiépült rendszer előnyei közül kiemelendő a *költséghatékonyság* és az *operativitás*. Jóllehet tudományos szemszögből előző nem

feltétlenül mérvadó tulajdonság, az alkalmazási oldalt is figyelembe véve mégis indokoltnak tartom mindkettő hangsúlyozását. Az operativitás az olyan projektek szempontjából válik különösen fontossá, melyek gyorsan változó jelenségek vizsgálatára fókuszálnak (BAKÓ. 2010). Ilyen alkalmazási területet jelentenek a Szeged környékén dinamikusan terjeszkedő főlías kertgazdaságok, a havária események (pl. árvíz, belvíz, erdőtüzek) és a városi felszínek is (VAN LEEUWEN ET A., 2008, 2012A).

A kisformátumú légifelvételzés létjogosultságát a nagyobb (pl. országos) légi adatgyűjtési kampányokkal történő összevetés tovább erősítheti (4.2. táblázat). A rugalmasan megválasztható időfelbontás mellett a felvételek térbeli és spektrális felbontása is jobban igazodik a kutatások igényeihez. A repülési magasság függvényében változtatható a legkisebb térképezhető felszíni objektum (képelem, pixel) mérete, amely akár a centiméteres nagyságrendbe is eshet. Ez a tartomány jobban harmonizál a korábban említett jelenségek és objektumok jellemző méreteivel. Összehasonlításképpen az országos felvételzés 1 méteres – vagy újabban 50 cm-es - felbontással jellemezhető, a műholdképek pedig általában csak 4-30 méter felbontású multispektrális adatokat képesek szolgáltatni.

4.2. TÁBLÁZAT A tradicionális és a kisformátumú (SPAF) légifelvételzés néhány általános jellemzőjének összehasonlítása
(Forrás: Aber et al., 2010.)

	TRADICIONÁLIS	KISFORMÁTUMÚ (SPAF)
FILM / CCD MÉRETE	9 inch (23 cm) / több 10 MP	35 v. 70 mm / néhány MP
SPEKTRÁLIS TARTOMÁNY	Pankromatikus (fekete-fehér), RGB (valós színes), színes-infravörös (CIR)	
KAMERA MÉRETE, FÓKUSZTÁVOLSÁG	több 10-100 kg 6 v. 12 inch (152 v. 304 mm)	könnyűsúlyú (~kézi) néhány 10 mm
HORDOZÓESZKÖZ, REPÜLÉSI MAGASSÁG	Kétmotoros repülőgép, közepes – nagy magasság (3000-12000 m)	Kisebb, rugalmasabban használható eszközök, emberi vagy távirányítással: egy-motoros repülőgép, helikopter, ultrakönnyű és vitorlázó repülők, ballonok, modellrepülők, sárkányok, általában néhány 100 m repülési magasság
FELVÉTELKÉSZÍTÉS KONTROLLÁLÁSA	Számítógépes (+GPS) vezérlés, sztereoszkópikus lefedés	
KÖLTSÉGEK, FELHASZNÁLÓK	több 10-100 ezer \$ nagy, regionális, állami projektek, kereskedelmi vállalatok	néhány 100-1000 \$ egyéni alkalmazás, kisebb projektek

A felhasznált felvételek spektrális információtartalma a látható, a közeli-infravörös és a hőtartományú infravörös spektrumból származik. Ezzel szemben a korábbi országos felvételzések (2000, 2005, 2007) csak látható (RGB) adatokkal szolgáltak. A rendelkezésünkre álló információtöbblet többek között felhasználható a vízfelületek és növényzet állapotának (közeli-infravörös sáv), valamint a felszín termális kisugárzásának vizsgálatára.

A rendszer költséghatékonyságának vizsgálata során a műszer beszerzési és repülési költségek mellett figyelembe kell venni az adatfeldolgozásra fordított munkaórát is. A felvételzés során rögzített – GPS/INS - pozíció információk nem megfelelő pontossága kevesebb automatikus eljárást tesz lehetővé, ami nagyban megnövelheti a feldolgozási időt és költségeket.

A kisformátumú kamerák legtöbbször nem rendelkeznek precíz geometriai és radiometriai kalibrációval. Ennek hiányában nem érhető el a mérőkamerák geometriai

pontossága, és a rögzített spektrális információk értelmezése is problémákat okozhat. A légköri hatások alacsony repülési magasságok mellett sem elhanyagolhatóak. A nyers DN (digital number) értékek nem összevethetőek az atmoszférikus korrekción átesett műholdas vagy légifelvétel adataival, az egyszerűbb manuális korrekciós eljárások – *empirical line*, *flat field* – pedig csak tovább növelik a feldolgozási időt és költségeket.

4.2.1.2. Felvételező rendszerek (navigáció – kamera – adatrögzítés)

A következőkben részletesen bemutatom az alkalmazott képkészítő rendszereket. Elsőként a navigációs alrendszert és a hordozóeszközt, majd külön-külön a kamerákat jellemzem. Végül a repülési terv készítésének rövid lépéssorát és szoftveres támogatását vázoló fel (TOBAK ET AL., 2008A).

Navigációs rendszer

A felvételek készítése során rögzíteni kell azok térbeli helyzetére vonatkozó információkat. A kép(elő)feldolgozás során ezek segítségével teremthető meg a kapcsolat a képi és valós térbeli (földrajz) koordináta-rendszerek között. A térbeli információk rögzítése a hordozóeszközeire szerelt GPS/INS rendszerekkel történik. Esetemben csak GPS-es adatrögzítés történt, a tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy a megfelelő geometriai pontosságú felvételek – gyors – előállításához mindenképpen szükséges a platform elfordulási szögeit rögzítő inerciális rendszer (INS) is.

A GPS nemcsak a képek feldolgozásához nyújt információkat, hanem a felvételezés során navigációs célokat is szolgál: segíti az előre megtervezett nyomvonalon haladást, illetve vezérelheti a képkészítést is. A pilóta munkáját a grafikus felületet kínáló navigáló szoftverek mellett Garmin GPSMAP 296 is segítette.

Az alábbiakban az alkalmazott és a lehetséges GPS adatrögzítési megoldásokat mutatom be röviden.

(1) Navigációs pontosság

A legegyszerűbb esetben a GPS adatrögzítés navigációs vevővel (Magellan Sport Trak Color) történt, ami optimális esetében 5-15 m térbeli pontosságot képes biztosítani. A navigációt Mobile Mapper CE térinformatikai vevővel támogattam, ami a Digiterra Explorer mobil térképező programmal együtt grafikus felületet is kínált a pilótának. Mindkét vevővel NMEA adatrögzítés történt, amit a felvételek feldolgozása során használtam fel.

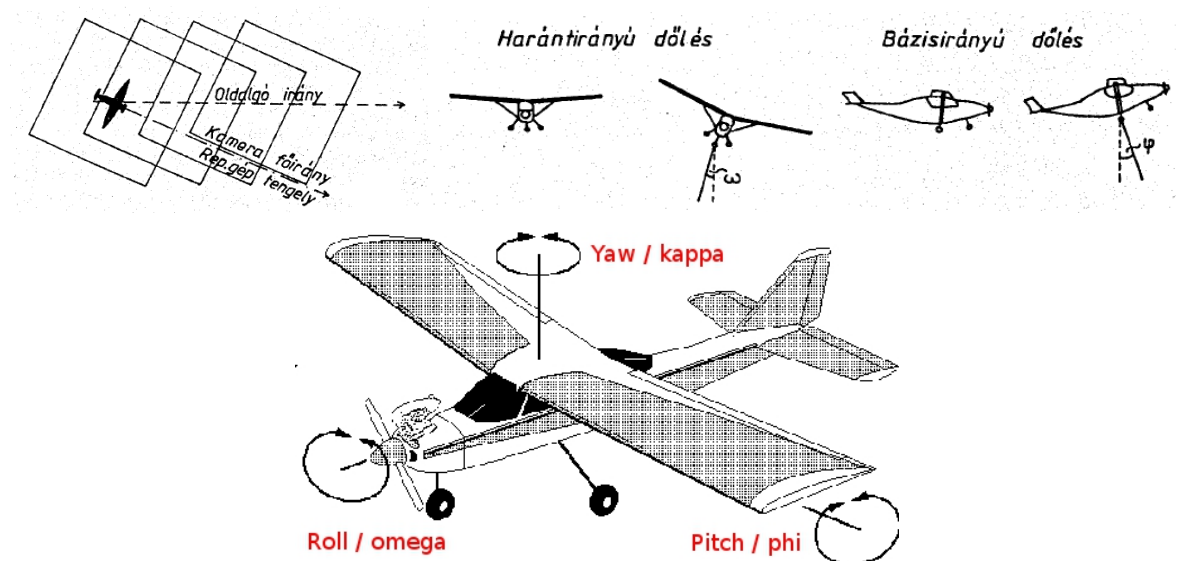
(2) Navigációs pontosság a Kappa elfordulási szög mérésével kiegészítve

A Trimbe Aerial Camera rendszer részét képező GPS modul két – a repülőgépen hossz tengelyével párhuzamosan, egymástól pontosan 80 cm távolságban felhelyezett – antennából és az azok jeleit feldolgozó egységből áll. A rendszer nemcsak a pozíció mérésére képes, de a két antenna egymáshoz viszonyított helyzetéből meghatározza a platform függőleges (Z) tengely menti elfordulási (Kappa) szögét is (4.4. ábra). A GPS adatfeldolgozó rendszerhez további antennabementen RTK vagy utólag korrigálható jelek is érkezhettek. A navigálás során csak az előre definiált méretű térbeli buffer zónákban történik exponálás – az el nem készült képekhez a rendszer utólag visszavigál. A tervezett képközéppontok mellett tárolásra kerülnek az képkészítés tényleges XYZ koordinátái, illetve a kappa elfordulási szög.

(3) Nagy pontosságú abszolút és relatív pozíciók rögzítése

A légifelvételzés pozícióadatainak gyűjtésére ideális esetben komplex GPS/INS megoldást kellene használni. Ezzel az XYZ koordináták mellett mindhárom tengely körüli

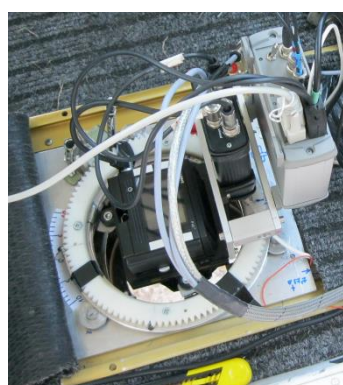
elfordulási szög (ω -phi-kappa) nagy pontossággal rögzítésre kerülne, ami a képek térbeli tájékozását automatikus folyamattá egyszerűsíthetné (4.4. ábra).



4.4. ÁBRA A repülőgép lehetséges elfordulásai a felvételezés során (Forrás: BÁCSATYAI ÉS MÁRKUS, 1992)

Hordozóeszköz – Cessna C-172 Skyhawk II

A kisformátumú légifelvételésekhez a hordozóeszköz egy külső partner cég által biztosított Cessna 172 Skyhawk II típusú gép volt. A kamerák és a hozzájuk tartozó kiegészítő elemek ezen a 4 üléses kisrepülőgépen kerültek elhelyezésre. A beépítést követően a pilóta mellett 1-2 fő kezelőszemélyzet tartózkodhatott. A későbbiekben bemutatásra kerülő DuncanTech és FLIR kamerák a repülőgép poggyásztéréből kinyújtott szerkezeten kerültek rögzítésre. A Trimble kamera a pilóta melletti ülés helyén, a padlólemez nyílásán keresztül készített felvételeket (4.5. ábra).



4.5. ÁBRA A kamerák rögzítése repülőgépen: DuncanTech kamera a poggyásztér ajtajában (balra), Trimble kamera a padlólemezbe süllyesztve (jobbra)

A légifelvételző platformmal három különböző kamerát használtam. Ezek közül eredetileg csak egyet terveztek légi alkalmazásra. A következőkben a képkészítő eszközöket mutatom be röviden.

DuncanTech MS3100 CIR

A felvételező rendszer alapját kezdetben egy DuncanTech MS3100 CIR (Color-InfraRed, színes-infravörös) digitális multispektrális kamera adta. Ehhez kapcsolódott egy

adatgyűjtő számítógép – a kamerából érkező képek mentését végző framegrabber bővítőkártyával –, a navigációt segítő és a repülési útvonalat rögzítő navigációs és térinformatikai GPS vevők (Magellan Sport Track Color, Mobil Mapper CE és Garmin GPSMAP 296), illetve az energiaellátást biztosító akkumulátorok és szünetmentes tápegységek (4.6. ábra).



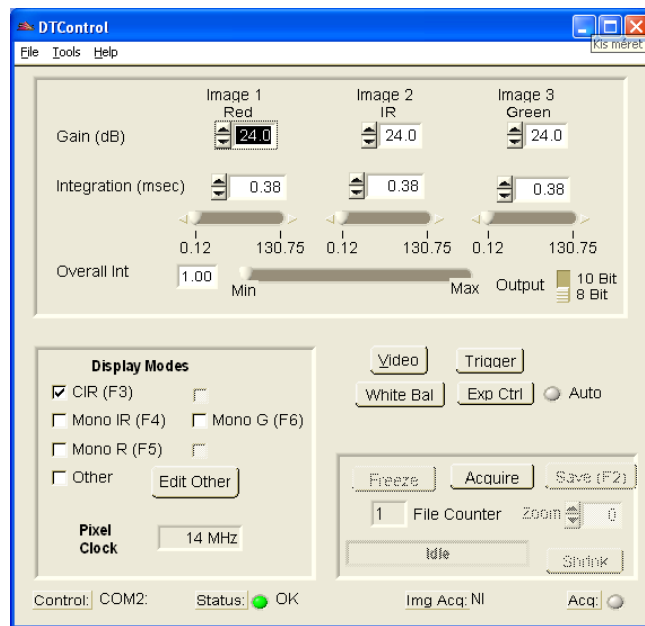
4.6. ÁBRA A CIR felvételező rendszer hardver komponensei

A DuncanTech MS3100 digitális multispektrális kamara 3 önálló CCD szenzort tartalmaz, melyek külön-külön detektálják az előttük elhelyezett prizma által felbontott fény vörös (Red), zöld (Green) és közeli infravörös (NearIR) tartományban érkező fotonjait (3/A. melléklet). A 3 szenzor egyenként programozható, mellyel nemcsak az érzékenységük (gain), de az alkalmazott integrációs idő is a felhasználó igényei szerint állítható. Ezzel lehetőség adódik például a közeli IR tartomány felerősítésére a vizek vagy a növényzet felvételezésekor, kihasználva azok jellegzetes NIR reflektanciáját.

A szenzorok 1392x1040 db detektorból épülnek fel, melyek fizikai mérete egyenként 4.65x4.65 mikron. A detektorok radiometriai felbontása 10 bit, ami maximálisan 2^{10} , azaz 1024 intenzitásérték megkülönböztetését teszi lehetővé. Ezzel már viszonylag csekély reflektancia eltérések is azonosíthatók a felvételezett objektumokon. A rendszer terepi felbontása mindenkor az alkalmazott optika és a repülési magasság függvénye. Az általunk használt nagy fényerejű Tokina AT-X 17 AF Pro objektív esetén például 1524 méteres repülési magassággal számolva a térbeli felbontás 44 cm.

A képek számítógépre mentését egy mini számítógép és az abba telepített National Instruments IMAQ 1428 típusú framegrabber PCI kártya végezte. A kamerából Camera Link kapcsolaton keresztül 3 csatornán 8-8 bit adat érkezett a framegrabber-be. Az adatrögzítés további beállításai – képkészítési gyakoriság, mentési név és hely, integrációs idő, szenzor érzékenység - a kamerával szállított DT Control szoftverben a felvételezéssel egy időben elvégezhetőek (4.7 ábra).

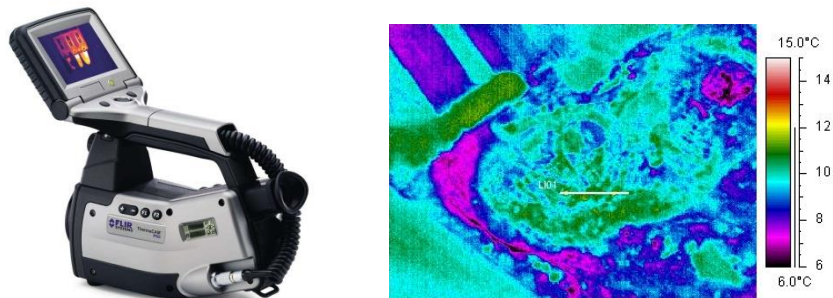
A felvételezés során az előre megtervezett nyomvonalon a navigálás, illetve a repülési útvonal rögzítése navigációs és térinformatikai GPS vevővel történt. A Windows CE alapú készüléken futó Digiterra Explorer mobil GIS szoftver a navigálást segítette, míg a Thales saját GPS Status alkalmazása a GPS adatok NMEA formátumú rögzítését végezte. Ennek utófeldolgozásával kaptam a repülés ~5 méteres pontosságú GPS track-jét.



4.7. ÁBRA A DT Contor szoftver kezelőfelülete, melyen a felvételezés közben módosíthatók a legfontosabb beállítások

FLIR ThermaCam P65 (TIR)

A hőtartományú felvételezés során használt FLIR ThermaCam P65 kamera az Alsó-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság (ATIVIZIG) tulajdonát képezi (4.8. ábra). Rendkívül hőérzékeny ($0,08^{\circ}\text{C}$) detektorral felszerelt, kis súlyú, gyors reakcióidejű készülék. A beépített detektor felbontása 320×240 képpont. A felvételezett objektum által kibocsátott infravörös sugárzás a germániumlencséből álló objektívra esik. A tárgylencse mögött található az ún. kiválasztó rendszer, amely két oktaéderprizmából áll, az egyik függőleges síkban, míg a második vízszintes síkban forog. A kiválasztó rendszeren való áthaladás következtében lineáris kép alakul ki. A kamera -40°C és $+500^{\circ}\text{C}$ közötti tartományban képes mérni.



4.8. ÁBRA A FLIR P65 kamera (jobbra) és egy meddőhányóról készült nyers kép (balra)(Forrás: ATIVIZIG)

A kamera az adatokat memóriakártyára menti – a felvételezéshez tehát nem szükséges fedélzeti számítógép. A képi információk JPEG formátumban kerülnek tárolásra. A tényleges – pixelenként - $^{\circ}\text{C}$ -ban értelmezett hőmérsékleti adatok ACSII CSV formátumban nyerhetők ki a kamerából.

A hőkamerás felvételezés tervezése és a navigáció a CIR rendszerrel ismerttetettek szerint történt.

Trimble Aerial Camera – PhaseOne P45+ (RGB/CIR)

A Trimble légi képkészítő megoldása – korábban RolleiMetric Aerial Industrial Camera (AIC) - moduláris felépítésű: cserélhető objektívból, digitális hátfalból és elektronikus vezérlő egységből épül fel (4.9. ábra). A kamera külön-külön használható RGB és CIR objektíveket

és Phase One P45+ típusú hátfalat tartalmaz. A laboratóriumban kalibrált objektívek 47 mm fókusz távolságúak, melyekhez – a repülőgép aljára szerelhető – fénymérő is kapcsolódik. A kameratest mozgó alkatrészeket nem tartalmaz. Az alkalmazott PhaseOne P45+ hátfalat elsősorban nem légifelvételhez használják. Érzékelőjének fizikai mérete 49,1 x 36,8 mm, amely 7216 oszlopban és 5412 sorban összesen 39 millió 6,8 x 6,8 mikronos detektort tartalmaz. Ennek megfelelően 10 cm-es térbeli felbontású képek készítéséhez a felszín feletti 691 m magasságból kell felvételezni; egy-egy kép pedig 723 x 543 m kiterjedésű. A szenzor radiometriai felbontása 16 bit.

Az elkészült felvételeket a hátfalba illesztett Compact Flash (CF) memóriakártyán tárolhatjuk, amely a nagy képméretű és az egymást követő gyors expozíció igényeinek kiszolgálása érdekében nagy írási sebességgel kell, hogy rendelkezzen. A kamera a képeket speciális veszteségmentes tömörítéssel IIQ RAW formátumban tárolja (IIQ small: 27 MB/kép), amit az irodai Capture One szoftverrel konvertálhatunk kb. 113 MB méretű TIFF állományokká. A hátlapon kisméretű LCD kijelzőn folyamatosan nyomon követhetők az elkészült képek. A hátlap áramellátását saját – cserélhető – akkumulátor biztosítja.

A vezérlő egység (blackbox) a fénymérőből és a GPS egységből érkező jelek alapján végzi a hátfal – az expozíció – irányítását. A vezérlő áramforrása egy 24 voltos külső akkumulátor.

A két különálló antennából érkező GPS adatokat az AeroNav Vector modul dolgozza fel (4.9. ábra). A hordozható számítógépen futó AeroTopoL navigációs szoftverrel RS232 porton keresztül kommunikál, melynek utasításait továbbítja a blackbox irányába. Működéséhez 24 voltos áramforrást igényel.

A rendszer részét képezi még egy hordozható számítógép, melyen a navigációt irányító AeroTopoL program fut, illetve egy külön kijelző a pilóta számára. Ez utóbbin a legfontosabb navigációs információk jelennek meg, segítve a pilótát a tervezett nyomvonal tartásában.

A teljes felvételező rendszer kapcsolási rajza a 3/B mellékletben látható.

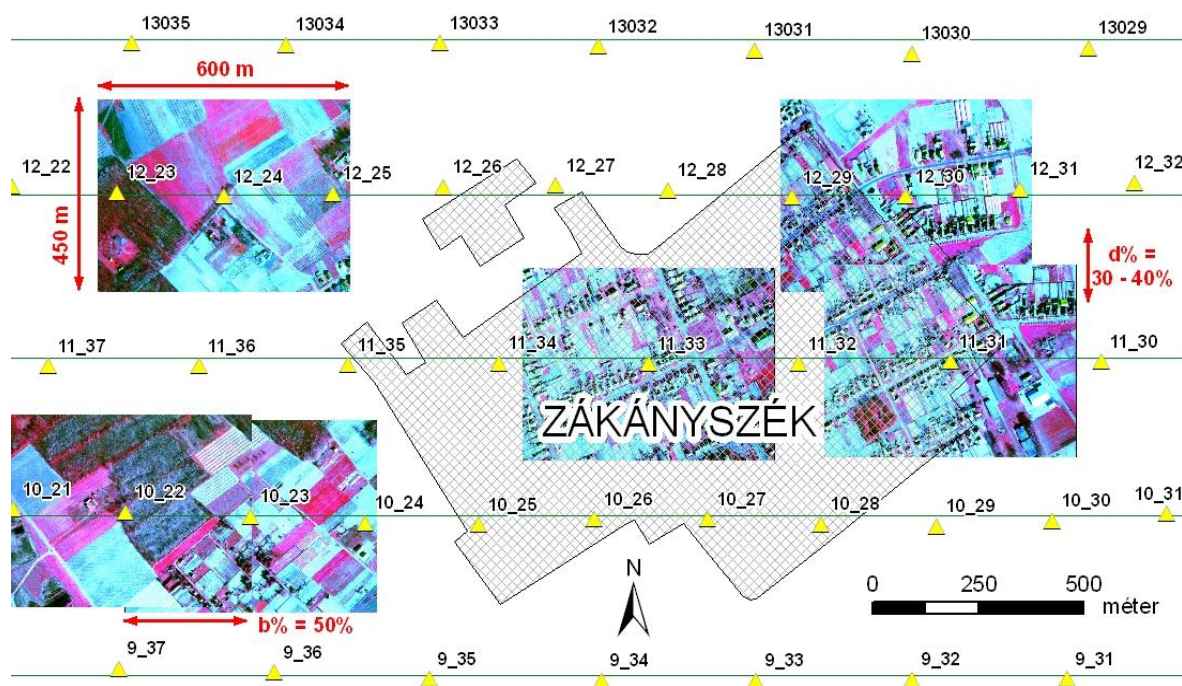


4.9. ÁBRA A Trimble Aerial Camera (A: objektív - B: kamera test - C: digitális hátfal - D: vezérlő), az AeroNav Vector modul és a GPS antenna pár (Forrás: Trimble⁵ / GGS GmbH⁶)

⁵ <http://www.trimble.com/imaging/Trimble-Aerial-Camera.aspx>

Repülési terv készítése

A felvételezést megelőzően, a repülési terv készítése során meg kell határozni, hogy a felvételezendő terület lefedése milyen módon történjen. Nemcsak a repülés tervezett nyomvonalát kell tehát rögzíteni, hanem a kívánt képkészítési időintervallumot is. Ehhez a repülési sebesség és az egy kép által lefedett terület méretei mellett – mely utóbbi fix objektív esetén csak a repülési magasság függvénye – meg kell határozni a szomszédos képek (b) és képsorok (d) távolságát is. A későbbi sztereo kiértékelés érdekében minimálisan 50-60%-os bázisirányú és 20-30%-os harántirányú átfedést kell biztosítani. A CIR kamera esetében például a fentiek figyelembe vételével felszín felett 2000 méteres magasságról, 150 km/h-s sebesség mellett a képkészítés gyakorisága 1 kép/4 másodperc, a szomszédos sorok távolsága pedig - a repülési irányra merőlegesen állított kamera esetén – 600 méter (4.10. ábra).

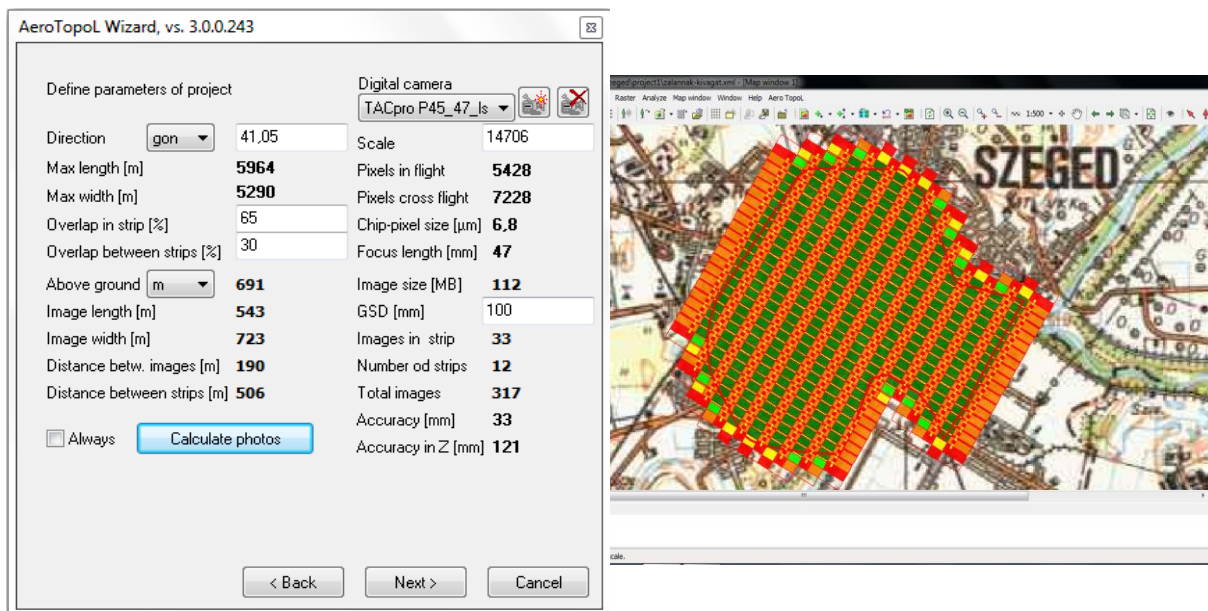


4.10. ÁBRA Egy CIR felvételezett terület részlete a tervezett és tényleges repülési útvonalakkal, néhány példaképpel és jellemző paraméterrel (Forrás: TOBAK ET AL., 2008B)

A nem légifelvételezésre tervezett DuncanTech és FLIR rendszereknél a fenti paraméterek meghatározása – külön tervező szoftver hiányában – részben manuális folyamat, melyet azonban Excel számológépekkel meggyorsíthatunk. Ezek ismeretében a repülési pásták és a tervezett képközéppontok térinformatikai szoftverben könnyedén megszerkeszthetők.

A komplett rendszerként elérhető Trimble AC megoldás saját tervező – és navigáló – programmal rendelkezik. Az AeroTopoL szoftver a mintaterület, a kívánt térbeli felbontás és a bázis, illetve harántirányú átfedések megadását követően automatikusan megtervezi a repülést. Legenerálja a nyomvonalakat, a képközéppontokat és a képek felszíni „lábnyomait” is (4.11. ábra).

⁶ <http://www.aerotopol.com/assets/applets/Aeronav-flyer.pdf>



4.11. ÁBRA A szegedi felvételezés repülési terve (jobbra) és paraméterei (balra) az AeroTopoL szoftverben. A különböző színezések a képek közötti átfedések számát illusztrálják.

Felvételezett területek, adatmennyiségek

A fent bemutatott – saját adatgyűjtésből származó – felvételezések mindhárom szenzor esetében Szeged város teljes – körtöltésen belüli és részben új-szegedi – területét lefedték. A kamerák geometriai tulajdonságaitól és a célul kitűzött térbeli felbontástól függően különböző számú egyedi képből álltak össze a teljes mozaikok. Az adatgyűjtések legfontosabb paramétereit a 4.3. táblázatban foglaltam össze.

4.3. TÁBLÁZAT A saját adatgyűjtések legfontosabb paraméterei
(A – worldTIFF, B – CSV, C – TIFF, D – IMG)

SZENZOR	Felvétel időpontja	Térbeli felbontás [cm]	Egyedi képek/adatfájlok mérete			Összes képszám [db]	Mozaik mérete [MB]
			[px]	[m]	[MB]		
DuncanTech MS3100 (CIR)	2008.04.20. 2008.06.25.	50	1392x1040	696x520	4,1 ^A	335	~600 ^D
Flir ThermoCam P65 (TIR)	2008.08.12. 2008.08.14.	250	320x240	800x600	0,36 ^B	285	~18 ^D
Trimble Aerial Camera (RGB)	2011.03.30.	10	7216x5412	721x541	117 ^C	317	~11600 ^D

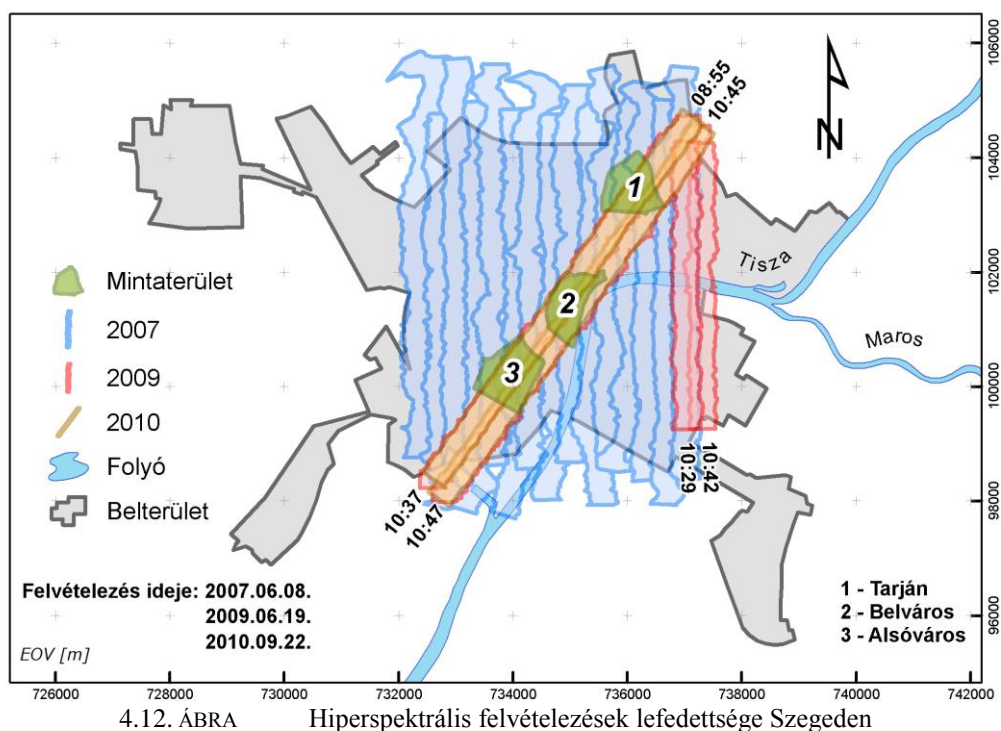
4.2.2. AISA Dual hiperspektrális felvételezés

Az FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet és a Debreceni Egyetem Víz- és Környezetgazdálkodási Tanszék 2006-ban a Gazdasági Versenyképesség Operatív Program pályázat keretében, EU-s támogatással beszerzett egy SPECIM gyártmányú AISA DUAL hiperspektrális távérzékelő rendszert. A szegedi felvételezés(ek)e)t ezzel a szenzorral végezte az Envirosense Kft.

A két szenzorból (VNIR – Eagle, SWIR – Hawk) összeépített rendszer legfontosabb technikai paramétereit a 3/C melléklet mutatja be. A két szenzor együttesen 359 spektrális sávban készít felvételeket, melyekkel a 400-2450 nm hullámhossztartományt képes lefedni. Az egyes felvételezési sávok szélessége 2,3, illetve 5,8 nm. Ezzel tulajdonképpen szinte folytonos spektrumot szolgáltat nemcsak a látható és közeli infravörös, de a közepes

infravörös tartományban is. Az érzékelő push-broom (toló-seprő) rendszerű: a repülőgépre szerelt érzékelő horizontális tengelyén a terepről érkező egy pixelnyi képet képezi le 24°-os látószöggel (320 pixel), a vertikális tengelyén pedig az adott geometriai ponthoz tartozó spektrum jelenik meg. DUAL üzemmódban (400-2450nm) az 1,5 méteres térbeli felbontáshoz 1208 m magasan kell repülni, a lefedett felszíni sáv szélesség 444 méter. A rendszer további fontos alkotóeleme a 100 Hz-es GPS/INS egység (OxTS – RT 3003), illetve a vezérlő és adatrögzítő számítógép (3/C melléklet) (DEÁKVÁRIÉS KOVÁCS, 2007).

Az AISA Dual szenzort hazánkban elsőként 2007-ben alkalmazták. A kísérleti, kalibrációs célú felvételezések egyikét Szegeden végezték, melynek eredményeképpen a város teljes területét (~40 km²) 15 pásztában fedték le. A felvételek előfeldolgozása – beleértve a radiometriai és geometriai korrekciót – már a tanszéken történt. Mivel felszíni referencia mérések ekkor nem történtek, ebből az időpontból csak radiancia információk állnak rendelkezésünkre. A geokorrigálást a rendszer GPS egysége (C-Migits III) miatt ekkor még csak utólagos időszinkronizációval tudtam elvégezni. A felvételező rendszer hardvereleminek fejlesztése keretében nagy pontosságú 100 Hz-es Oxford RT3000 sorozatú GPS/INS vevőre cserélték a korábbi hely(zet)meghatározó egységet, így a felvételek térbeli pontossága jelentősen javult (TAMÁS ET AL. 2009).



4.12. ÁBRA Hiperspektrális felvételezések lefedettsége Szegeden

A 2009-es, kora nyári felvételezés már a kiválasztott városi mintaterületek alapján történt 2-2 ÉK-DNy, illetve É-D irányú pásztában. A felvételeket előfeldolgozva, geometriai, radiometriai és atmoszférikus korrekciók után kaptam meg a külső partner cégtől. A harmadik adathalmaz 2010 szeptemberéből származik, amikor a 2009-es területek közül már csak az ÉK-DNy-i újbóli lerepülése történt meg (4.12. ábra).

A nyers adatokon az előfeldolgozási lépéseket – az ún. cross-track illumination hatások kiküszöbölése érdekében – tanszékünkön is lefuttattam. Ezeket részletesebben az adatfeldolgozás (4.4.5) fejezetben mutatom be. Az AISA Dual szenzorral hazánkban városi területen elsőként 2007-ban Szegeden végrehajtott hiperspektrális légifelvételezést az utóbbi években több is követte Szombathelyen, Székesfehérváron és Sopronban (VISINÉ ÉS KIRÁLY, 2011). A 4.4. táblázatban a 3 szegedi felvételezés főbb paramétereit gyűjtöttem össze.

4.4. TÁBLÁZAT AISA Dual felvételezések Szegeden
(A - radiancia, 16-bit unsigned integer; B – reflektancia, 32-bit floating point)

PARAMÉTER	2007	2009	2010
Időpont	2007. június 8.	2009. június 19.	2010. szeptember 22.
Pázták száma	15	4	2
Geometria felbontás	1,5 m		
Spektrális tartomány	400 – 2450 nm		
Spektrális felbontás	359 sáv		
Spektrális sávszélesség	2,3 nm (400-970 nm), illetve 5,8 nm (970-2450 nm)		
Adatmennyiség	30 GB ^A	60 GB ^B	40 GB ^B

4.3. Terepi referenciaadatok gyűjtése

A későbbi felszínborítási osztályozások ellenőrzéséhez – a nagyfelbontású légifelvételtől kinyert pontok mellett – terepi adatgyűjtést is végeztem, melynek keretében mobil térinformatikai megoldások tesztelése is történt. A rendszer GPS vevővel ellátott mobil számítógépből és térképező szoftverből állt.

Hardver

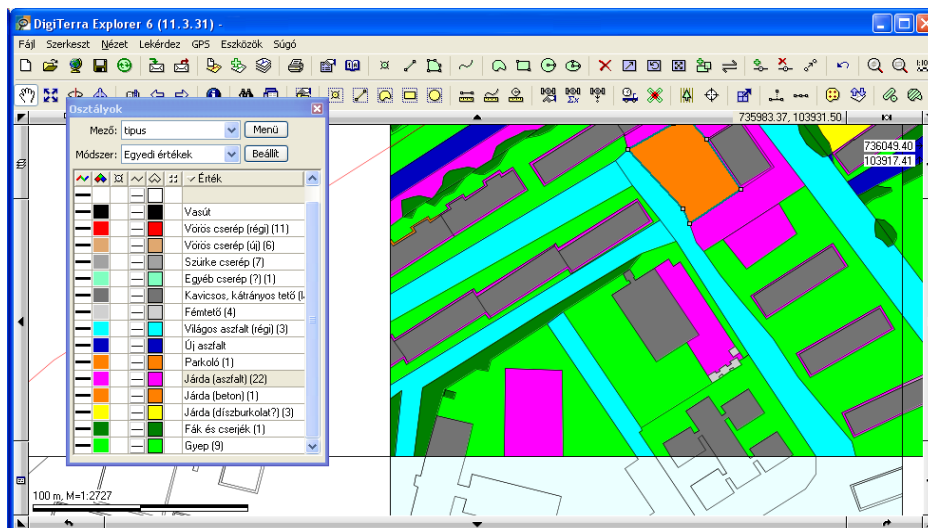
A Trimble Juno SB⁷ egy kompakt, időjárásálló mobil adatgyűjtő eszköz. GPS vevője SBAS (EGNOS) korrekcióval akár 2 méteres terepi pontosságot is lehetővé tesz. Windows Mobile 6.1 operációs rendszerre különféle mobil GIS szoftverek telepíthetők. Beépített kamerájával a felmérés helyszínén fényképek készíthetők, melyet a szoftver képes geokódolni és az aktuálisan rögzített objektum attribútum táblájához kapcsolni.

Szoftver

Terepi térképezésre számos mobil GIS alkalmazás érhető el. Ezek közül a magyar fejlesztésű Digiterra Explorer⁸ szoftverrel végeztük a terepi adatgyűjtést. A program az EOVR rendszerű vektoros és raszteres adatrétegeket egyaránt kezeli, a terepi digitalizáláshoz jól használható eszköztárat biztosít. Nagy előnye, hogy viszonylag egyszerűen létrehozhatók benne egyedi kódtáblák és hozzájuk kapcsolódó szimbólumrendszer. Ezek az előre definiált felszínborítási kategóriák felmérését jelentősen meggyorsítják. A szoftver irodai környezetben is használható, az utólagos javítások így könnyedén elvégezhetők (4.13. ábra).

⁷ http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-436692/022501-189F_Juno%20SB_DS_0712_MGIS_HR_nc.pdf

⁸ <http://www.digiterra.hu/hu/termekek/digiterra-explorer.html>



4.13. ÁBRA Digiterra Explorer terepi térképező szoftver asztali verziójának képernyője

Az adatgyűjtés módszere és problémái

Az adatgyűjtés megtervezése során a város vektoros alaptérképét használtam fel, ami jó kiindulási alapul szolgált. Raszteres réteggént 1:10000-es topográfiai térképet töltöttem fel a készülékekre. A gyorsabb kirajzolás érdekében a mintaterületeket szabályos grid mentén tovább osztottam. A térképezendő osztályoknak megfelelő kódtáblát és a hozzájuk kötődő jelkulcsot a feldarabolt vektoros állományokhoz kapcsoltam, így az adatfelvétel során – a geometria megrajzolását követően – elegendő volt egy legördülő listából kiválasztani a kategóriát. A digitalizálás során topológiai helyes állomány jött létre.

A terepi adatgyűjtés számos hibalehetőséget rejt magában. Alapvető problémát jelent, hogy – mivel légifelvételek kiértékeléséhez történt a referenciaadatok gyűjtése – figyelembe kellett venni a különböző kitakarásokat. A sűrűn benőtt utcák aszfalt és díszburkolatait – vegetációs időszakban - sokszor teljesen befedi a lombkorona, ami így az osztályozott felvételeken is növényzetként jelenik meg (4.14. ábra). A kitakarások másik formáját, ami főként a többszintes beépítések esetében jelenik meg, az épületek „kidőlése” okozza. A légifelvételek perspektív leképezéséből eredő hiba a terepi felmérés során nem kezelhető, hiszen különböző szögből készülő képeken más-más területek kerülnek kitakarásra. Ez főként a lakótelepi mintaterületen jelent – területi arányait tekintve - nagyobb problémát, de valamilyen mértékben minden kiemelkedő objektum körül jelentkezik. A sztereo képekből kinyert magassági információk alapján elvégzett ortokorrekciónál, illetve – elegendő számú felvétel esetében - megfelelő mozaikolással a hiba kiküszöbölhető.

További problémát okoz a terepi adatgyűjtés során, hogy a magasabb – vagy szűkebb utcákban álló – épületek tetőborítása az utcaszintről nem látható. Ilyen esetekben megoldást jelenthet a környék egy magasabb házának tetejéről végezni a térképezést. Ekkor azonban a GPS helyett csak a vektoros alaptérkép segítheti a pontos geometria rögzítését.



4.14. ÁBRA Pélá az épületek kidölése (balra) és a növényzet okozta (jobbra) kitakarásra

4.4. Adatok előfeldolgozása

A következő alfejezetben áttekintem a különböző technológiákkal előállított adathalmazok interpretációt megelőző előfeldolgozását. Elsőként a pozícióadatok rendszerezésére térek ki, majd sorra veszem a CIR, TIR, RGB és hiperspektrális állományokon végrehajtott műveleteket.

4.4.1. GPS adatok

A nyers légifelvételek geometriai korrekciójához szükséges legfontosabb alapadat a felvételezés során rögzített GPS nyomvonal (*track*). Ennek tárolása – a különböző felvételezések során – más-más rendszerben történt. Minden esetben rendelkezésemre állt a repülőgép *X,Y,Z koordinátáival* adott pozíciója a képkészítés (vagy ahhoz közeli) időpillanatában. Származtatott adatként hozzáférhető a repülési irány (*course*) információ is. Ezt két egymást követő pozícióból egyszerű trigonometriai számítással határoztam meg. A felvételek valós térbeli helyzetének megállapításához szükségünk lenne a platform – 3 tengely menti – elfordulási szögeinek ismerete is (4.4. ábra). Ezek mérésére inerciális navigáció rendszereket (INS) használnak, mely azonban – a költségtényezők minimalizálása érdekében – nem alkotta a kisgépes felvételező rendszer részét. A három – *omega, phi, kappa* – szög felhasználásával már nemcsak a képek középpontja és tájolása állítható vissza a felvételi helyzetbe, de légi háromszögeléssel és ortorektifikációval a perspektív torzulások is kiküszöbölhetők.

A saját felvételező rendszerrel történő – CIR, TIR és RGB – adatgyűjtés során különböző módszerekkel történt a navigációs adatok rögzítése. A 2008 tavaszától alkalmazott CIR/TIR platformon egy térinformatikai GPS vevő (MobileMapper) szolgált repülési navigációs és adatgyűjtési eszközként egyaránt. Ezt – a kamerát kezelő személyzet részére – az aktuális pozíciót térképen jelző navigációs GPS (Magellan Sport Trak Color) egészítette ki. Valós időben mindkét műszer 5-15 méteres vízszintes pontosságot biztosított (VAN LEEUWEN ET AL. 2009A). A térinformatika vevőt – a Windows Mobile 5 platformon futó – mobil térinformatikai szoftvere (Digiterra Explorer) tette alkalmassá a pilóta navigálására és a pozícióadatok NMEA 0183 formátumú tárolására.

A felvételezés során rögzített NMEA fájl GGA sorai a fix GPS pozíció (latitude, longitude, altitude) mellett idő (UTC) adatot is tartalmaznak. Az ASCII formátum könnyen feldolgozható, a számunkra fontos információk egyszerűen kinyerhetők belőle. A rögzített

pozíciók X,Y,Z koordinátái és UTC Time adatai relációs adattáblába rendezhetők. Az egyes rekordokat (pozíciókat) az idő bejegyzések alapján szinkronizálni kellett a felvételekkel. Ehhez a CIR kamera – pontosabban a hozzá kapcsolódó framegrabber kártya – által mentet képek esetében a képkészítési – Windows rendszer – időt, a hőképeknél pedig az előnézeti JPEG állományok EXIF adatait használtam fel.

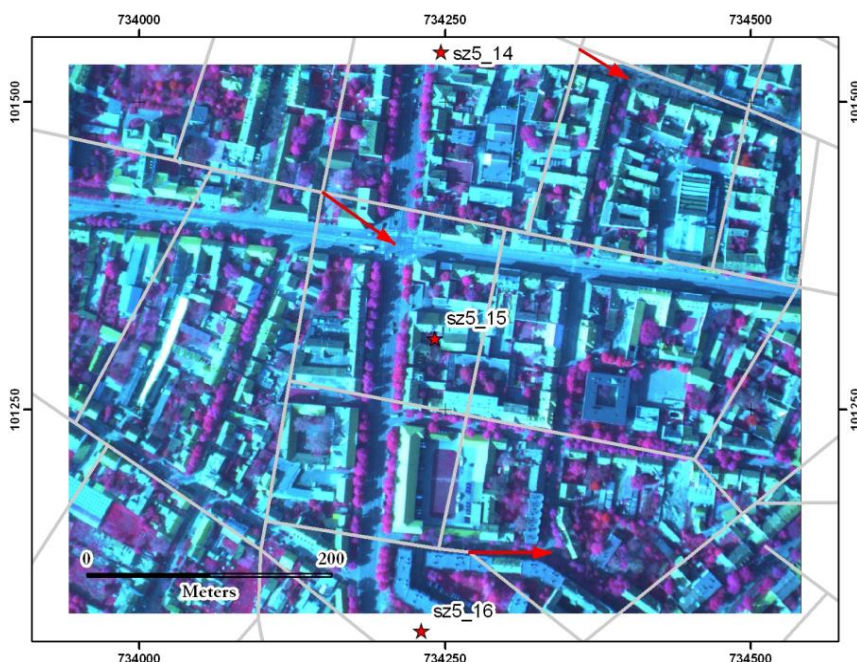
A RBG (Trimbe) felvételező rendszer navigációs alrendszere az előzőeknél sokkal fejlettebb funkcionalitással bír. A GPS modul (AeroNav Vector, 4.9. ábra) nemcsak a pozíciók tárolásáért felelős, hanem egy kioldó funkción (trigger) keresztül a képkészítést (exponálást) is vezérli. A modul 2 db 10 Hz-es antenna jelét felhasználva képes meghatározni a platform aktuális irányát (heading) is, ami a fotogrammetriában a kappa elfordulási szöget jelenti. Lehetőség van kétfrekvenciás, 100 Hz-es GPS antenna csatlakoztatására is, ami – utófeldolgozással - nagyobb térbeli pontosságot és precízebb időszinkronizálást tesz lehetővé, így a képkészítési pozíciók tovább javíthatók. A modul a kameravezérlés mellett pilóta és a kezelő személyzet számára navigációs információkat is szolgáltat. Az adatok megjelenítéséért, feldolgozásáért és tárolásáért a rendszer részét képező Aero TopoL szoftver felel. A felvételezés során nyomon követhető az elkészült képek által lefedett terület, illetve módosítható a repülési pásztlák tervezett sorrendje és iránya is.

A GPS rendszerek WGS 84 koordináta rendszerben tárolt pozíció adatait a feldolgozás során EOVS vetületi rendszerbe kellett transzformálni. A CIR és TIR repülések esetében ezt külső szoftverrel végeztük el, míg az Aero TopoL belső transzformációval dolgozott és közvetlenül EOVS rendszerben szolgáltatotta az adatokat. A további – rendszer specifikus - koordináta feldolgozási lépéseket az egyes kamerákhoz kapcsolódó részekben részletesen is tárgyalom.

4.4.2. CIR adatok

A CIR képek feldolgozásának első lépésében a GPS által másodpercenként rögzített NMEA állományból kinyertem a repülés tényleges útpontjainak X,Y és Z koordinátáit, illetve idő adatát. Az így generált dBASE tábla rekordjait az idő (TIME) mező alapján ArcView 3.2 szoftverben kapcsoltam össze a képkészítés pontos - Windows rendszer - idejét is tároló kamera log fájlal. Ezzel a művelettel minden képközépponthoz valós EOVS (X,Y) és magassági koordinátákat rendeltem. A következő lépésben ezeket a koordinátákat – és a felszíni felbontás értékét – használtam fel ún. world fájlok (.tfw) létrehozásához.

A world fájlok egyszerű ASCII szöveges formátumok, melyekkel JPEG vagy TIFF fájlokhoz rendelhetünk földrajzi koordinátákat. A GPS által rögzített koordinátákkal így gyorsan és automatikusan készíthetünk georeferált képeket felvételeinkből. A world fájlok alkalmazása csak 0 vagy 180°-os képelforgatás esetén hatékony módszer, éppen ezért amennyire lehetséges, igyekeztem olyan repülési irányokat választani, hogy ez megvalósulhasson. A 0 vagy 180°-os forgatást igénylő TIFF-ekhez kapcsolódó .tfw world fájlok generálása Avenue script-tel történt ArcView 3.2 szoftver-ben (4/A melléklet). A fentitől eltérő elforgatási szög esetén a world fájlok mellett az ArcGIS Rotate eszközt is felhasználtam egy Python script-en belül. A world fájlok segítségével durva geometriai korrekció valósult csak meg, melynek pontossága – a repülési körülményektől (magasság és billegés) függően – maximum 150-200 méter (4.15. ábra) (TOBAK ET AL., 2008B).



4.15. ÁBRA World fájlal durván georeferált felvétel Szeged belvárosából

A pontos geometriai korrekció már jelentős manuális munkát igényelt. Miközben a képközéppontok X és Y koordinátái jellemzően 100-200 méteres szórást mutattak, egyedül a kappa szög értéke volt becsülhető a repülési sorok irányából. E pontatlan és hiányos külső tájékozási paraméterek miatt az ERDAS fotogrammetriai (LPS) moduljában csak nagyszámú felszíni illesztőponttal volt elvégezhető a légiháromszögelés.

Az egyedi képeket ezután ArcGIS Raster Catalog-ba rendeztem, majd egyetlen állományként Raster Dataset-be mentettem el. Ennek során megtörtént az összemozsaikolt képek hisztogramjainak kiegyenlítése is.

A feldolgozás során a képek radiometriai és atmoszférikus korrekcióját – kalibrációs adatok hiányában - nem végeztem el. Az egy repülés során készített képek egymással ez esetben is összevethetők, illetve a felvételekből térbeli információ ettől függetlenül is kinyerhető.

4.4.3. TIR adatok

A hőkamerás felvételek esetében is lehetőség nyílik az utólagos korrekciókra, amely szoftveresen hajtható végre. A párhuzamosan végzett terepi felszínhőmérséklet mérések eredményeivel az egyes pixel értékek ellenőrizhetővé és kalibrálhatóvá váltak, a felvételek relatív termális skáláját abszolút skálává lehetett átalakítani. A terepi méréseket Szeged két mintaterületén (belváros, lakótelep-bevásárló központ) 40 db, reprezentatív városi felszíntípussal rendelkező (aszfalt, beton, kő, fű, talaj, víz) pontban végezték el kézi kontakt-mérővel (DCP D100047 ProTemp szenzor, LogIT DataMeter 1000 adatgyűjtő) (UNGER ET AL. 2010A). A feldolgozás után a termográfiai felvételeket adatfájlba mentették ki. Így a képek hőmérsékleti értékeit pixelenként tartalmazó mátrixot kaptam.

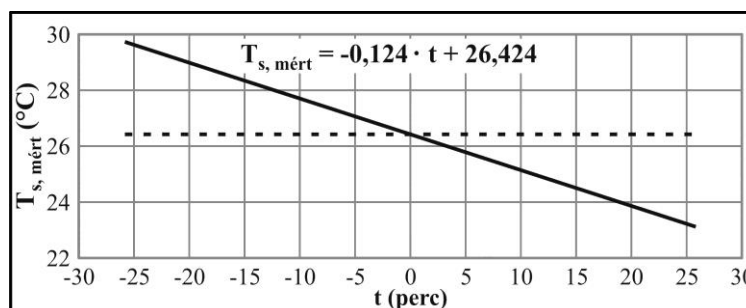
A felvételezés két különböző adatállományt eredményezett. A JPEG formátumban tárolt 8 bites képi információ mellett a 14 bites kalibrált felszínhőmérsékletek CSV formátumú ASCII állományban kerültek tárolásra. Az ASCII adatok raszteres – GeoTIFF – formátumba konvertálását ArcGIS-ben Python scripttel végeztem el. Ebben a lépésben a GPS által rögzített pozícióadatokat – kamera log fájl hiányában - a JPEG állományok EXIF időadataival

kapcsoltam az egyedi felvételekhez. Ezután az átfedő területek alapján – az ERDAS Imagine AutoSync moduljával – készült el a végleges mozaik (SZATMÁRI ET AL., 2010).

A repülés ideje alatt – kb. 51 perc - bizonyos csökkenés mutatkozott a felületek hőmérsékletében. Szignifikáns kapcsolat esetén - a területi összehasonlítás érdekében - a kapott pixelértékeket az általános hűlési tendenciának megfelelően korrigálni kellett a felvételezés középidejére (19.00 UTC). A 2008. augusztus 14-én kimutatható szignifikáns trend alapján az SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi tanszékének munkatársai által számított regressziós egyenest kaptuk (4.16. ábra). Annak érdekében, hogy a pixelértékeket a felvételezés középidejére vonatkoztathassuk, a kapott hűlési tendenciát figyelembe vevő (a képkészítés idejétől függő) korrekciót hajtottak végre minden egyes pixelre: a középideő előtti értékeket időarányosan csökkentették, míg az utána felvett értékeket időarányosan megnövelték.

$$T_{s,mért} = -a \cdot t + b \qquad T_s = T_{s,mért} + a \cdot t \qquad (1)$$

ahol $T_{s,mért}$ az eredeti pixelérték, a a trendegyes meredeksége, t az idő percben $(-25,5 - 25,5)^*$, b a trendegyes értéke a középideőnél és T_s a korrigált pixelérték (UNGER ET AL., 2010A).



4.16. ÁBRA A pixelértékek ($T_{s,mért}$) regressziós egyenese az idő (t) függvényében (2008. aug. 14.)
(Forrás: UNGER ET AL. 2010A)

4.4.4. Valós színes (RGB) adatok

Trimble kamerarendszer a felvételeket – veszteségmentesen tömörített formában – Compact Flash (CF) kártyán tárolja el. A nyers képek mellett a felvételezés további kimeneti adatát ASCII formátumú navigációs információk adják. Ezek az AeroTopoL⁹ szoftver egy RawTXT és egy AeroTXT nevű fájlba menti. Előbbi minden rögzített repülési adatot tartalmaz, míg utóbbiban csak a feldolgozás szempontjából lényeges képszámok, képközéppont koordináták és elfordulási szögek találhatók meg (4/B melléklet). Mindkét szövegfájl header (fejléc) részében olvashatók a repülési terv adatai (koordinátarendszer, tervezett képméret, sor- és képtávolság, felszíni felbontás, pontosság, stb.). Az ASCII formátumú tárolás nagy előnye, hogy a fájlok könnyen feldolgozhatók, a kívánt információk – pl. ERDAS LPS szoftverbe importálható külső tájékozási paraméterek – egyszerűen kinyerhetők. A rendszerhez kapcsolódó GPS egység a képközéppontok XYZ koordinátáit és kappa elfordulási szögét szolgáltatja.

A tömörített TIFF állományokat a Capture One¹⁰ szoftverrel teljes felbontású, darabonként 113 MB-os képekké konvertáltam. A program az átalakítás mellett lehetőséget biztosít számos képfinomítási művelet (pl. szín- és lencsekorrekciók) végrehajtására is. A további feldolgozás már a kitömörített felvételekkel történt.

* Az 51 perces mérési időtartam miatt.

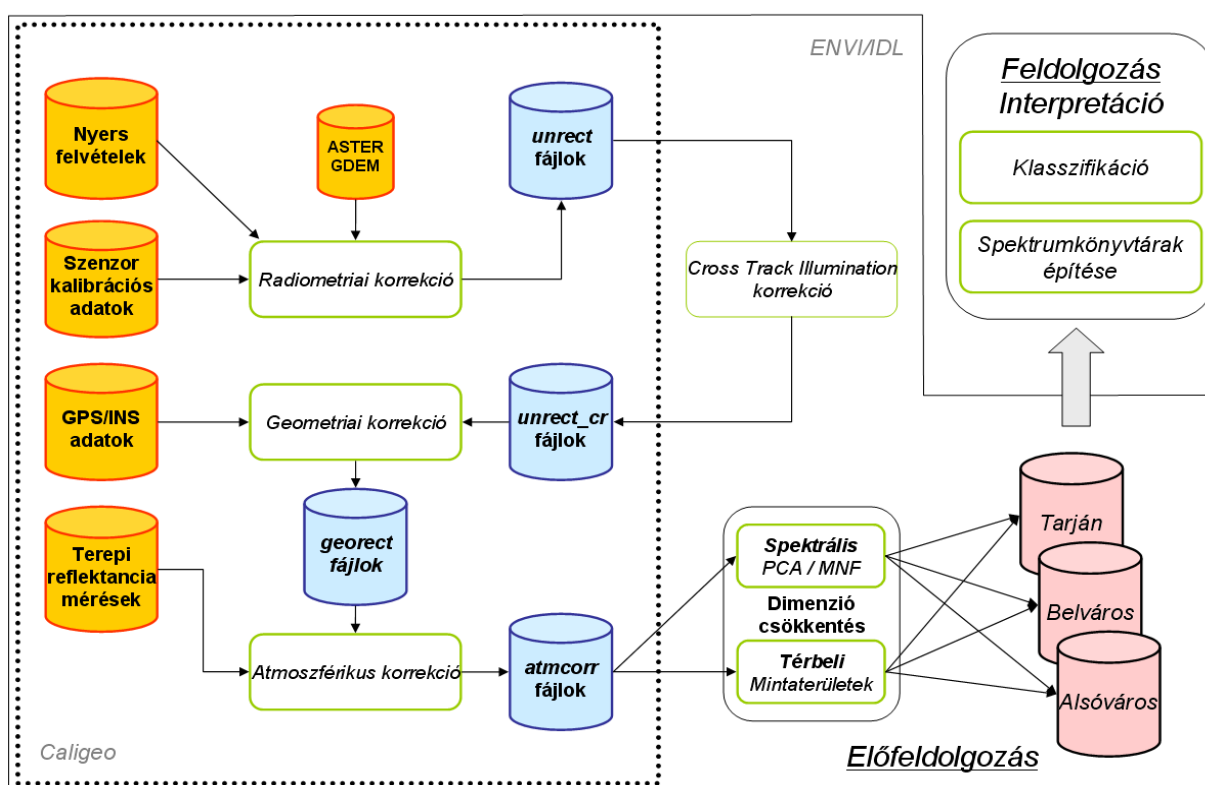
⁹ http://www.aerotopol.com/html/spec_aerotopol.html

¹⁰ <http://www.phaseone.com/en/Imaging-Software/Capture-One-Pro-7.aspx>

A 10 cm-es térbeli felbontással készített felvételek geometriai korrekcióját és ortorektifikációját a CartoHansa Kft. végezte el. A feldolgozáshoz szükséges – közel 100 – felszíni illesztőpont (GCP) felmérése a tanszék Leica Viva típusú RTK műszerével és közreműködésével történt 2011. április 21-22-én és 29-én. A GCP-k optimális térbeli elosztását az AeroTopoL szoftver által előre generált – egymást átfedő - képi „lábnyomok” (*footprint*-ek) segítették. Kapcsolópontnak olyan, jól azonosítható felszíni pontokat kerestünk, melyek több (5-6) képen is megjelentek. Ezáltal biztosítottá vált a 317 db képekből felépülő teljes blokk valós térbeli koordináta rendszerbe helyezése. A légifotók eredeti - felvételi pozícióba - helyezése a valós XYZ és omega-phi-kappa külső tájékozási paraméterek meghatározását jelentett. Ezt a művelet az ERDAS Imagine LPS moduljával végeztük el.

4.4.5. Hiperspektrális adatok (elő)feldolgozásának lépései

A hiperspektrális légifelvételek feldolgozásának általános lépéseiről HARGITAI (2006) közölt átfogó folyamatábrát. Ez a lépéssor – egyszerűsítésekkel - a mi esetünkben is alkalmazható volt (4.17. ábra). A következőkben a legfontosabb műveleteket mutatom be, kiemelve az egyedi, illetve problémás pontokat.



4.17. ÁBRA A hiperspektrális adatok előfeldolgozásának lépései

A felvételeket az EnviroSense Kft. készítette és előfeldolgozva adta át részemre. Az előfeldolgozás magában foglalta a radiometriai, a geometriai és az atmoszférikus korrekciókat. Utólag – a sávon belüli megvilágítási viszonyok változása miatt – szükséges volt az ún. *cross track illumination* hatások kiszűrése, amit a nyers adatokon kellett elvégezni. Így a teljes előfeldolgozási lépéssort újra végrehajtottam.

Az AISA Dual adatok előfeldolgozása ENVI + IDL 4.7 és a kamerát fejlesztő Specim cég által írt Caligeo plugin segítségével történt.

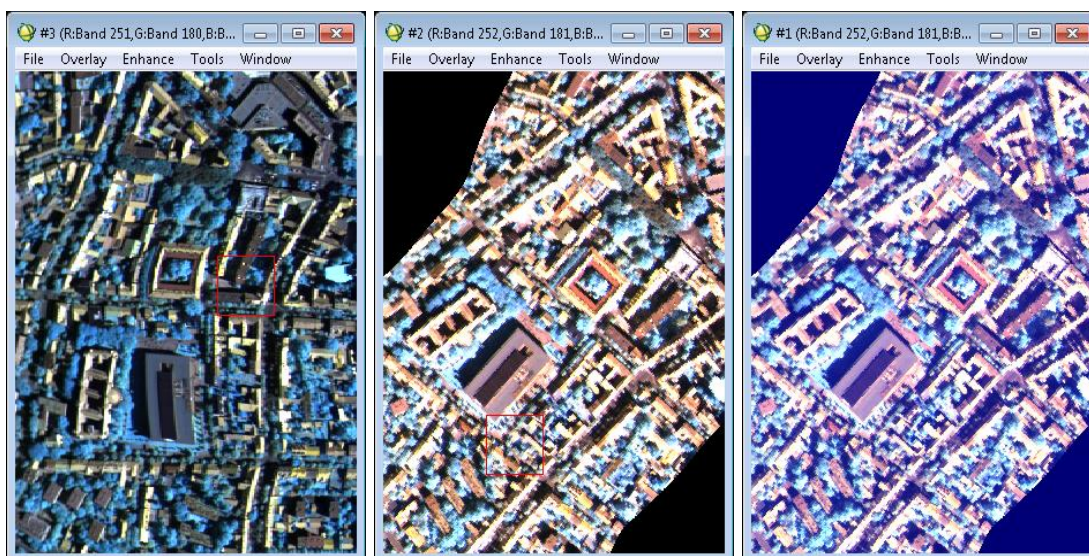
Az AISA Dual adatok előfeldolgozása során a radiometriai korrekció → cross-track illumination korrekció → geometriai korrekció → atmoszférikus korrekció →

dimenziócsökkentés (optimalizálás) sorrendben végeztem el a műveleteket. A következőkben ezeket a lépéseket mutatom be részletesebben, miközben röviden elméleti háttérüket is taglalom.

4.4.5.1. Radiometriai korrekció

Az ENVI-hez telepíthető Caligeo kiegészítő modul (plugin) számos bementi adathalmaz és paraméter megadását követően radiometriailag (*unrectified intermediate*) és geometriailag korrigált (*georect*) felvételeket állít elő a nyers adatokból. A feldolgozáshoz szükség van a nyers (*raw*), csak DN (digital number) értékeket tartalmazó képre, a szenzor kalibrációs adatait tartalmazó *calibration* fájlra, az ún. *dark* képre – mely esetemben megegyezett a raw felvétellel – és a GPS/INS szenzorok által rögzített feldolgozott navigációs adatokra (*4/C melléklet*). A felszín domborzati viszonyait ASTER GDEM modellezte.

Első lépésben csak a radiometriai korrekcióra került sor, aminek eredményeképpen az adatfájl pixelei radiancia ($\text{mWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) értékeket kaptak. Az adattárolás BSQ (band sequential) módon történt. A pixelek helyzete továbbra is csak képi koordinátarendszerben adott, aminek következtében – a repülőgép mozgásait tükrözve – az egyenes vonalak hullámozva jelennek meg a képeken (*4.18. ábra*).



4.18. ÁBRA Csak radiometriai (balra), radiometriai és geometriai (középen), illetve atmoszférikus korrekción is átesett (jobbra) AISA Dual felvétel részlet az SZTE BTK és JATIK épületeinek környékéről

4.4.5.2. Cross-track illumination korrekció

Optimális esetben a felvételezés során a szenzor a Nap irányába repül, ami a felszíni objektumok jó megvilágítását eredményezi. Az ettől eltérő tájolású repülési pástákon azonban változatos árnyékhatások, fényszórás és visszaverés jelentkezik. Ennek kiküszöbölése érdekében a radiancia értékek számítását követően az radiometriailag korrigált (*unrect*) felvételeken cross-track illumination korrekciót hajtottam végre. É-D irányú repülésnél ez a hatás legerősebben keresztirányban (*Sample*) jelentkezik. A program sávonként (359 db) kiszámolja a képi mátrix minden oszlopára az átlagos radianciát, majd ezekre az átlag görbékre 2. fokú polinomiális függvényt illesztve eltávolítja a keresztirányban jelentkező változásokat (*4/D melléklet*).

Az eredményül kapott – korrigált – radiancia értékeket tartalmazó állományokat a Caligeo-ban *Unrectified intermediate file*-ként használtam fel, majd a következő lépésben ezeket geokorrigáltam.

4.4.5.3. Geometriai korrekció

A hiperspektrális adatok geometriai korrekciója hasonlóan történik, mint bármely más távérzékelte felvétel esetében. A nagy pontosságú referencia adatok általában rendelkezésre állnak, vagy terepi méréssel (GCP) felvehetők. A felvételezés során GPS és INS szenzorok rögzítik a platform pontos pozícióját (X, Y és Z) és relatív elfordulását (κ , φ és ω). Ezeket az adatokat a felvételezési sorokkal szinkronizálva meghatározható minden pixel valós térbeli koordinátája.

Az AISA felvételezés során a rögzített nyers navigációs adatokból bináris *nav* fájlok készülnek, melyet a képek geometriai korrekciójához használtam fel. Míg 2007-ben – az akkor használt GPS/INS rendszer pontatlansága miatt - csak manuális idősinkronizációval sikerült a felvételek geokorrigálása, a 2009-es és 2010-es felvételezés során ez teljesen automatikus eljárassá egyszerűsödött.

A feldolgozott állományok pixelei UTM koordinátákat kaptak. Térbeli felbontásuk – legközelebbi szomszéd (nearest neighbor) átmintázást követően – 1,5 méter lett.

Az előfeldolgozási lépések közül a geometriai transzformáció igényelte a legnagyobb erőforrásokat, ennek futtatása tartott a leghosszabb ideig.

A Caligeo-ban végrehajtott radiometriai és geometriai korrekciós lépéseket felvételi pásztánként meg kellett ismételni. A beállítások *opt* fájlba kimenthetők voltak, így csak a nyers adat állományok és a mentési nevek cseréjét kellett minden esetben elvégezni.

4.4.5.4. Atmoszférikus korrekció

Annak érdekében, hogy a különböző felvételeket egymással vagy terepi mérésekkel összevethessük, az atmoszférikus korrekció során a pixelek radiancia értékeit felszíni reflektancia értékekké kell konvertálni. Matematikai értelemben a mért reflektancia - hullámhosszanként - a fényforrás (Nap) spektrumának, a napállás és topográfia által meghatározott megvilágítási körülményeknek, a légkör sugárzást áteresztő tulajdonságainak és a szenzor nyereségének szorzata. Ehhez további módosító tényezőként társul a szenzor belső zaja és a légköri szórás okozta többszörös sugárzás.

Passzív távérzékelés során a detektált sugárzás kétszer is áthalad a légkörön. Az atmoszféra a hullámhossz függvényében – elnyelési és szórási folyamatok eredményeképpen - különböző mértékben engedi át a sugárzást. Ezt a légköri transzmittancia görbén jól szemléltethetjük (4/E. melléklet). A vízgőz és szén-dioxid okozta elnyelési sávok 1400 és 1900 nm-nél figyelhetők meg, ahol majdnem a teljes beérkező energiát elnyelik, így szinte alig jut érzékelhető sugárzás – így információ sem - a szenzorba. Az abszorpció mellett a másik fontos jelenség a szórt sugárzás, amely növeli a detektorokon az energia intenzitását. Ez az ún. *path radiation*. Mivel az atmoszféra állapota (összetétele) – és a domborzati viszonyok következtében vastagsága is – a térben folyamatosan változik, a rögzített felvételen mutatkozó torzító hatások is pixelről pixelre eltérőek lehetnek. Kiküszöbölésükre éppen ezért az – alább részletezett - lineáris módszerek nem mindig megfelelőek.

A konverziós eljárások egy része csak képi információkon alapul (pl. *flat field conversion*, *average relative reflectance conversion*), míg a többi előzetes információkat igényel a felszínről és az atmoszféra állapotáról. A radiancia és reflektancia értékek közti kapcsolatot tapasztalati (empirikus) úton és paraméteres módszerek felhasználásával is meghatározhatjuk.

Az egyik legegyszerűbb tapasztalati eljárás – az általam is alkalmazott empirical line korrekció – során a két vagy több – a felvételen is azonosítható - mintaterületről gyűjtött referencia spektrum és a nekik megfelelő képi – radiancia - spektrumokból lineáris egyenlet írható fel minden egyes sávra. A függvény meredeksége a multiplikatív radiancia faktorok összegzett hatását mutatja (*gain*), míg az egyenes radiancia (függőleges) tengellyel alkotott

metszéspontja (*offset*) az additív komponenseket. Az így meghatározott összefüggéssel az összes pixel reflektanciája kiszámítható, amely azonban csak ún. látszólagos (*apparent*) reflektancia érték, és nem tükrözi a topográfia (árnyék és légköri út) hatásait. Emellett az ilyen lineáris módszerekkel nem lehet kiszűrni a képen belül változó eloszlású hibákat, mint a légköri vízgőz vagy aeroszolok hatását sem (SMITH, 2012).

A parametrikus eljárások már figyelembe veszik a légkör térben heterogén – mért vagy modellezett - tulajdonságait is, és képesek a szabálytalanul jelentkező hatások azonosítására és kiszűrésére. A számítógépes modellekkel (pl. MODTRAN, ATCOR, FLAASH) végrehajtott konverziók során egy szimulált irradiancia spektrumból kiindulva, az aktuális napállást alapul véve, modellezett (becsült) légköri állapotokkal számolunk. Míg a légköri gázok (szén-dioxid, oxigén) általában egyenletes eloszlásúak, a vízgőz koncentrációja pontról pontra változhat. Ennek becsléséhez – akár képelemenként – a vízelnyelési sávokat használják fel (GAO ET AL, 1993). Az eredményül kapott látszólagos reflektancia értékek azonban ez esetben sem tükrözik a topográfia (árnyék és légköri út) hatásait.

Fontos hangsúlyozni, hogy a topográfiai hatásokat figyelembe vétele nélkül nem lehetséges pontos reflektancia konverzió. A lejtőszög, a kitettség és az árnyékok domborzatmodellből levezethető paraméterek. Városi környezetben ehhez társulnak az épületek mikro-formái (épületek magassága, tetők dőlésszöge) is.

A három szegedi felvételezés közül csak a 2010-es időpontjában történtek terepi reflektancia mérések. Ennek megfelelően a 2007-es és 2009-es adatok atmoszférikus korrekciójára csak a képekben tárolt információk alapján vagy közelítő modellezéssel történhetett meg. A 2009-es felvételeket ATCOR modellel számított reflektancia értékekkel kaptam meg. A 2010-es felvételek mellé már a terepi mérések adatait is átadták. A kiválasztott pontokban ASD FieldSpec terepi spektrométerrel mért reflektancia és az ezeknek megfelelő képi pixeleken tárolt radiancia közti sávonkénti kapcsolat lineáris egyenletekkel írható le. Az így kapott *gain* és *offset* értékeket használtam fel a radiancia értékek konvertálására. Az átszámítást az ENVI fejlesztőkörnyezetében futó IDL script végezte el. Eredményül 32 bites lebegőpontos reflektancia pixelértékeket kaptam.

4.4.5.5. Dimenziócsökkentés (optimalizálás)

A hiperspektrális adatokat elsősorban nagy spektrális felbontásuk különbözteti meg a multispektrális szenzorok felvételeitől. A nagyszámú és keskeny felvételi sáv nagy adatmennyiségeket eredményez, mely sokszor – a szomszédos sávok esetében – redundánsnak is tűnik. A klasszikus – multispektrális adatokon alkalmazott - képfeldolgozási módszerek alkalmazhatók ez esetben is, de az adatállományban rejlő információk hatékonyabb kinyeréséhez azok finomítása és adaptálása szükséges. A sok-dimenziós adatfeldolgozási technikák napjainkban is aktív kutatások tárgyát képezik.

A spektrális sávok nagy száma egyszerre jelent előnyt és hátrányt is. A szinte folytonos spektrum lehetővé teszi a finom különbségek azonosítását. A nagy adatmennyiség azonban amellet, hogy feldolgozása jelentős erőforrásokat – hardvert és szoftvert – igényel, redundanciájával megnehezíti a valóban hasznos információk kinyerését. Éppen ezért a sok-dimenziós adathalmazok feldolgozásának első lépése a legtöbb esetben az adatállomány optimalizálása, – térbeli és spektrális kiterjedésének - szükséges méretűre csökkentése.

A *térbeli* dimenziót legegyszerűbben mintaterületek kijelölésével csökkenthetjük. Ezek kiválasztási folyamatáról és jellemzéséről a 3. fejezetben részletesebben írtam.

Spektrális dimenziócsökkentésre leggyakrabban alkalmazott eljárás a PCA (*Principal Component Analysis*) és az MNF (*Minimum vagy Maximum Noise Fraction*) transzformáció.

A főkomponens analízissel (PCA) egymással nem korreláló kimeneti sávokat állíthatunk elő, elkülöníthetjük a zaj komponenseket és csökkenthetjük az adathalmaz dimenzióját. Ehhez az N dimenziós adattér tengelyeit elforgatjuk és a képelemek spektrális koordinátáit átranszformáljuk (DAVIS, 1986). Az új tengelyek – N dimenziós adattérben, az

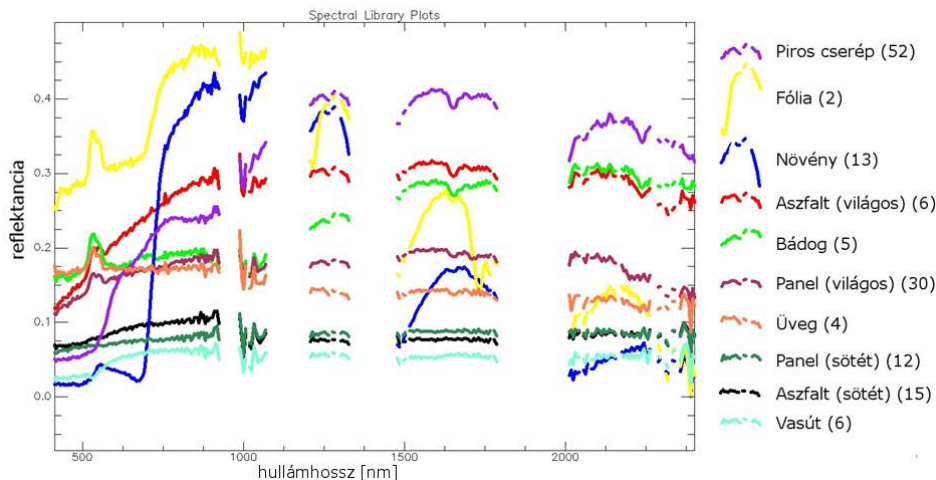
adatok normál eloszlását feltételezve – a hiperellipszoidok csökkenő hosszúságú tengelyeinek felelnek meg. A leghosszabb (fő) tengelyt az adatok első főkomponensének nevezik. Az első főkomponens iránya az első sajátvektor, a vektor hossza az első sajátérték. A további tengelyek további főkomponenseket képeznek, mely mindig a leghosszabb ellipszoidi átmérő, ami merőleges az előző komponensre. Az új adattérbe átranzformált pixelértékeket a PCA kép főkomponens sávjai tárolják. Az egyes sávok varianciája – a sajátértékeknek megfelelően – fokozatosan csökken, miközben csökken a sáv jel/zaj aránya (SNR) is. A transzformáció eredményeképpen létrejövő n főkomponens sáv közül az első néhány – az adatok nagy varianciája miatt – tartalmazza a teljes adat fájl információtartalmának közel 100%-át. A pixelértékek – spektrális térbeli koordináták – átszámítása lineáris egyenletrendszerrel történik, melyhez meg kell adni az n főkomponens sajátvektorait és sajátértékeit a kovariancia mátrixból a következő egyenlettel (MUCSI, 2003):

$$V = \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & v_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & v_n \end{bmatrix} \quad E \text{ Cov } E^T = V \quad v_1 > v_2 > v_3 \dots > v_n \quad (2)$$

ahol: Cov = a kovariancia mátrix,
E = a sajátvektorok mátrixa,
T = a transzpozíció függvény
V = a sajátértékek diagonális mátrixa, minden nem-diagonális elem 0.

A Minimum vagy Maximum Noise Fraction (MNF) esetében tulajdonképpen több lépcsős főkomponens analízisről van szó, melynek első lépésben a sávokat variancia alapján sorba rendezi, majd a zaj frakció dekorrelációját követően transzformálja a spektrális teret, csökkentve az adatok redundanciáját (GREEN ET AL., 1988). Az így kapott MNF sávok csökkenő mennyiségű zajt tartalmaznak, a további feldolgozási (pl. osztályozási) lépésekben már ezek képezhetik a bemeneti adatokat. Az első néhány – zajmentes – sávot gyakran visszatranszformálják az eredeti térbe, reflektancia értékekké (BOARDMAN ÉS KRUSE, 1994).

A felvételek spektrális dimenziójának csökkentése vizuális kiértékeléssel is történhet (*bad band selection*). Ennek során az egyes felvételi sávokat szürkeárnyalatban megjelenítve kiválogathatók a teljesen zajos vagy a felszíni objektumok körvonalait – az adott geometriai felbontás mellett elvártnál – csak homályosabban megjelenítő rétegek. Így az eredeti 359 sávból 119 került eltávolításra. Ezek egyrészt az Eagle és Hawk szenzor érzékelési tartományának szélein, illetve egymást átfedő részén, másrészt a távérzékelésben jól ismert légköri elnyeléssel és szórással terhelt tartományokban találhatók (4.19. ábra).



4.19. ÁBRA

A fontosabb felszínborítások reflektanciája a zajos sávok nélkül
(zárójelben az átlagolt minták száma)

5. ADATELEMZÉS

Az értekezés legfontosabb részét a különböző módszerekkel gyűjtött, majd előfeldolgozáson átesett távérzékelte adatok elemzése adja. A következő alfejezetekben a kiértékelési módszerek alapján strukturálva mutatom be kutatási eredményeimet.

Elsőként – az 5.1. *alfejezetben* - általánosságban tekintem át a rendelkezésemre álló adattípusok információtartalmát, majd az 5.2. *alfejezetben* a vizsgálat tárgyát képező, városi környezetben fellelhető legfontosabb felszínborító anyagok spektrális tulajdonságait részletezem nemzetközi kutatásokra, illetve saját tapasztalataimra alapozva. Ezt követően bemutatom a magassági (5.3.), a térbeli (alaki) (5.4.) és a spektrális (5.5.) információk kinyerésének folyamatát és eredményeit. Az 5.5. *alfejezetben* adatforrásonként elemzem a tisztán spektrális információkon alapuló, automatikus és irányított módszerekkel előállított felszínborítási térképeket. A következő részben (5.6) – az osztályozás megbízhatóságának növelése érdekében - kísérletet teszek a kinyert spektrális és magassági információk integrálására, majd értékelem a különféle algoritmusok alkalmazhatóságát és a térbeli kiterjesztés lehetőségeit (5.7).

A fejezet lezárásaként (5.8.) összevetem az Urban Atlas és a Corine Land Cover adatbázisok kategóriáit a mintaterületeimen térképezett felszínborítással, és néhány kivágaton kapcsolatot keresek a felmért felszínhőmérséklet és a felszínborítás között.

5.1. A képi információk kinyerésének lehetséges útjai

A rendelkezésre álló, különböző karakterisztikájú távérzékelte felvételekben és GIS rétegekben tárolt információk kinyerése általában adathalmazonként külön-külön lépésekben történik. Ezzel a módszerrel azonban sokszor nem teljes vagy nem elég hatékony a képi információk interpretációja. A technológiai fejlődéssel megjelenő nagyszámú szenzor adatainak feldolgozásakor egyre gyakrabban alkalmaznak ún. adatfúziós eljárásokat. Ennek során az egyes adathalmazokból más-más információs réteget emelnek ki, amely elősegíti az eredményül kapott hasznos információmennyiség maximalizálását.

Jelen kutatás távérzékelte és térinformatikai adatforrásokat egyaránt felhasznál. A következőkben röviden összefoglalom ezek tradicionális kiértékelésének lehetséges módjait.

A három spektrális tartományt lefedő **CIR** (Color-Infrared) **felvételek** esetében a különböző spektrális indexek számítása mellett egyszerű automatikus és irányított osztályozásokra is lehetőség nyílik. Az NDVI index alkalmazását a radiometriai és atmoszférikus kalibráció hiánya azonban megnehezíti: az önálló felvételek egymással így nem összevethetők. A felvételek közeli-infravörös sávja a növényzet és a vízfelületek könnyebb elkülönítéséhez járulhat hozzá. A felvételekben tárolt geometriai információk azonban – az 50 cm-es térbeli felbontásból következően – további interpretációs lehetőséget kínálnak, amit legegyszerűbben a szegmentálási módszerek alkalmazásával érhetünk el.

A felszín hőtartományú kisugárzását ábrázoló **TIR** (Thermal Infrared) **felvételek** egyetlen sávja nem alkalmas összetett spektrális osztályozásra. Egyszerű küszöbölési módszerekkel elkülöníthetők pixelosztályok, de leginkább más adatrétegekkel, azokat kiegészítve alkalmazható. A térbeli információ tartalom – bár kisebb skálán – szegmentálással itt is kinyerhető.

A 10 cm-es geometriai felbontással rendelkező **RGB légifelvételek** elsősorban térbeli információ tartalmukkal emelkednek ki. Az alkalmazható szegmentálási eljárásokról az 5.4. *fejezetben* részletesebben is írok. A három látható spektrális sáv – az objektumok színbeli

eltéréseire alapozva – alkalmas lehet – nem túl részletes – objektumosztályozásra is. A sztereo felvételezésből eredően az átfedő képterületeken – azaz a város szinte teljes belterületén – lehetőség van magassági információk kinyerésére is. Ezt részletesebben az 5.3. fejezetben tárgyalom.

A **hiperspektrális felvételek** esetében a feldolgozás a spektrális információk kinyerésére koncentrál. A hagyományos, multispektrális szenzoroknál megismert automatikus és irányított osztályozások mellett speciálisan a nagy dimenzióval jellemezhető adatterekre kifejlesztett módszereket is alkalmazhatjuk. Ezek nagy része végállású tagok (endmember-ek) előzetes felvételén és reflektancia görbéiből felépített spektrumkönyvtárakon alapul (5.2. fejezet). Természetesen lehetőség van szegmentálási eljárások alkalmazására is, azonban esetemben az 1,5 m-es térbeli felbontású, sokszor árnyékos felvételeken ez hatékonyan nem volt megvalósítható.

A kutatás során **GIS rétegek** is rendelkezésemre álltak. Ezek a városüzemeltetésben felhasznált CAD formátumú állományok a belterületi telekhatárokkal és épület poligonokkal, illetve a kijelölt mintaterületek vektoros állományai. A távérzékelte adatok feldolgozásában referenciaként és térbeli határoló tényezőként kerültek felhasználásra.

5.2. Spektrumkönyvtár létrehozása

A képalkotó spektrometria megjelenésével egyidejűleg kezdték meg a kutatók a különböző *spektrumkönyvtárak* létrehozását. A laboratóriumi körülmények között vagy terepen felvett „tisztá” spektrumok a képosztályozásokhoz biztosítottak referenciát, megadva az ún. *endmember*-ek spektrális tulajdonságait. Elsőként a különböző ásványok spektrumait rendezték könyvtárakba (ABRAMS ET AL., 1977), majd az alkalmazások körének bővülésével megjelentek a kőzetek, talaj, növényzet, víz/hó/jég és mesterséges felszínek könyvtárai is (ASTER, Johns Hopkins, JPL Library) (BALDRIDGE ET AL., 2009). Az első magyar hiperspektrális felvételező kampánnyal hazánkban is elkészültek az első spektrumkönyvtárak, melyek a terepi spektrométerek hazai elterjedésével tovább bővültek. Ugyanakkor ez idáig nem készült el a jellegzetes városi felszínek részletes könyvtára. Fontosnak tartom megemlíteni, hogy még az elvileg szabályozott laboratóriumi körülmények között rögzített referencia spektrumok sem tekinthetők minden esetben pontosnak. Erre mutatott rá a 2009-ben indított nemzetközi SpecTour projekt (JUNG ET AL., 2012). A labor és terepi spektrométerek alkalmazási módszertana nagyban befolyásolja a mért spektrumok megbízhatóságát.

Ebben a fejezetben bemutatom a városi felszíneket felépítő legfontosabb anyagok spektrális tulajdonságait, majd az elkülönítésükkel kapcsolatos problémákat. A geometriai, radiometriai és atmoszférikus korrekción átesett AISA Dual légifelvételek alapján minél teljesebb spektrumkönyvtár készítését tűztem ki célul. A laboratóriumi és terepi spektrumokhoz képest jóval zajosabb képi spektrumok elemzése során az egyes anyagok reflektancia görbéin megfigyelhető jellegzetességeket, valamint a görbék eltérései alapján kijelölhető – az osztályozások hatékonyságát növelő – hullámhossztartományokat vizsgáltam meg.

5.2.1. A városi felszín jellegzetes spektrális és geometriai tulajdonságai

A földfelszín távérzékeléses vizsgálatához mindenképpen szükséges az azt felépítő anyagok (bio)fizikai/kémiai – és ebből következő reflektancia – tulajdonságainak részletes ismerete. A városi környezet több szempontból is eltér a természetes vagy közel-természetes

felszínektől. Egyedi tulajdonságai sokszor speciális követelményeket állítanak a felhasználható távérzékelte adatokkal és módszerekkel szemben (HEROLD ÉS ROBERTS, 2010).

- (a) A városi objektumok textúráját a gyakran éles határvonalak jellemzik, ugyanakkor az objektumok belső varianciája nagy belső heterogenitást mutat.
- (b) Jellemző a teljes felszín heterogenitása is, az objektumok nagyon különböző méretűek lehetnek, átlagos méretük nehezen meghatározható. Azonban elmondható, hogy – más, természetes felszínekhez viszonyítva – relatíve kisebbek, így gyakoribbak a kevert képelemek is.
- (c) Megfigyelhető a természetes és mesterséges anyagok együttes jelenléte, keveredése. Előbbiek sokszor nagy területeket foglalhatnak el a városon belül (parkok, tavak).
- (d) Összetettebb geometria jellemzi az objektumokat, ami – a felvételezés esetlegesen alacsony repülési magasságával és a nagy látószöggel kiegészülve – jelentős különbségeket eredményez a megvilágításban. A Nap helyzete, az objektum geometriája és spektrális tulajdonságai, a repülési irány – egy szóval a Nap-objektum-szenzor geometria – közösen alakítja ki az árnyékos és megvilágított képrészeket.

5.2.1.1. Városi felszínborítások spektrális jellemzői és azok magyarázata

A városi területeket a (közel)természetes térszínektől eltérő típusú és anyagú felszínborítások jellemzik. Ezek térképezését megnehezíti, hogy spektrális tulajdonságaikat tekintve sokszor nagyon hasonlóak, ezért vizsgálatukhoz speciális távérzékelő szenzor konfigurációk alkalmazása javasolt.

A városi környezet távérzékeléses vizsgálata térbeli és spektrális értelemben is nagy kihívást jelent. Az objektumok térbeli kiterjedése általában kicsi, a térbeli heterogenitás nagy. JENSEN ÉS COWEN (1999) szerint a vizsgálatok minimálisan szükséges térbeli felbontása 5 méter, amit sokáig a műholdas felvételező rendszerek nem voltak képesek szolgáltatni, ezért az ilyen kutatások döntő részben légifelvételekre épültek, illetve épülnek sokszor ma is. A felszínt borító anyagok – sokszor hasonló spektrális tulajdonságaik miatt – nagy pontossággal csak megfelelő spektrális felbontás mellett különíthetők el. A képalkotó spektrometria ehhez szolgáltat - már nemcsak légi, hanem műholdas platformokon is – megfelelő felvételező technológiát és adatfeldolgozó módszereket.

A különböző anyagok spektrális tulajdonságainak vizsgálata spektrumkönyvtárakon alapul. Ezekben az ún. tiszta anyagok (pl. ásványok) folytonos reflektancia függvényeit tárolják, általában a 400-2400 nm hullámhossz-tartományon belül. A görbék mellett részletes dokumentációk (metaadatok) szolgáltatnak kiegészítő információkat (pl. felszín geometriai tulajdonságai, adatrögzítés körülményei, stb.). Spektrumokat laboratóriumi körülmények vagy terepi felmérések során is rögzíthetünk labor vagy terepi spektrométerrel. A hiperspektrális felvételekből is levezethetők spektrumkönyvtárak, melyek azonban a - nagyobb térbeli felbontásból adódó - kevert pixelek miatt jóval zajosabbak. Az ilyen felvételekben rögzített radiancia értékeket azonban előbb korrigálni szükséges (atmoszférikus hatások, fényforrás spektrális tulajdonságai alapján), majd felszíni reflektanciává kell konvertálni. Ezeket a könyvtárakat felhasználva, a görbék jellegzetes lefutása – ún. spektrális jellegzetességek (spectral features) – alapján a távérzékelte felvételeken a képelemek osztályozhatók, az egyes felszíni anyagok térképezhetők.

A városi felszíneket felépítő anyagokat 4 fő csoportba sorolhatjuk: (i) növényzet, (ii) különböző ásványok (talajok, köves területek), (iii) olajszármazékok (kátrány, aszfalt) és (iv) egyéb mesterséges anyagok, szénhidrogén származékok (festékek, műanyagok).

A legjellemzőbb városi felszínborító anyagok spektrumgörbéit vizsgálva az alábbi, *általános* megállapításokat tehetjük (HEROLD ÉS ROBERTS, 2010):

- 1) A **zöld vegetáció** (i) jellegzetes reflektancia csúcsot mutat 550 nm környékén, melyet a klorofil elnyelési sávjai (kék 450 és vörös 680 nm) határolnak. (ii) 750 nm környékén figyelhető meg az ún. vörös él (*red edge*), amely a levelek belső szerkezete és visszaverése következtében hirtelen megnövekedő reflektanciát jelzi. (iii) A közeli infravörös (NIR) tartományban 980, 1200, 1400 és 1900 nm-en a növények víztartalma nyeli el (*vibrational absorption*) a beérkező sugárzás jelentős részét, csökkentve ezzel a reflektanciát. (iv) A rövidhullámú infravörös (SWIR) tartományban – 2100 és 2300 nm-nél – a levelekben található lignin és cellulóz okoz jellegzetes (vibrációs) abszorpciós minimumokat a görbén.
- 2) A **csupasz talajfelszínek** infravörös tartományok felé fokozatosan növekvő reflektanciáját csak az agyagásványok abszorpciója töri meg 2200 nm környékén. A spektrum a látható (VIS) és közeli infravörös régióban egyébként nagy hasonlóságot mutat a nem-fotoszintetizáló (száraz) vegetációval, amely azonban a SWIR régióban rendelkezik a jellegzetes ligno-cellulóz elnyelési sávokkal. A kavicsos felszíneket – a talajok hasonlóan – a felépítő ásványaik abszorpciós minimumai jellemzik.
- 3) A különböző **tetőborítások** egyben változatos spektrumgörbéket is jelentenek, melyek sokszor összekeverhetők más – nem tetőfedésre használt, de anyagukban hasonló – felszínekkel. A hazánkban legelterjedtebb vörös – és egyéb színű – cserepek a NIR és SWIR tartományok felé növekvő reflektanciát mutatnak, melyet – a kiegészítés következtében eltávozó víztartalom miatt – nem törnek meg víz és hidroxil abszorpciós sávok. A látható és közeli-infravörös tartományban azonban jellegzetes vas-oxid elnyelés mutatkozik 520, 670 és 870 nm környékén. A nálunk ritkábban alkalmazott, főként növényi alapú tetőborítások (zsindely) a nem-fotoszintetizáló vegetációhoz hasonló görbével rendelkeznek, ligno-cellulóz abszorpciós sávokkal az SWIR tartományban.
- 4) Az **útburkolati anyagok** közül a *betont* cement, kavics, víz és egyéb összetevők építik fel. Ezek ásványai okozzák a 2170 nm (szilikátok, agyag), 2300 nm (hidrokarbonát, kalcit) és 2370 nm (hidrokarbonát, dolomit) körüli abszorpciót. Az alacsony reflektanciával rendelkező anyagokból álló *aszfalt* burkolatok görbájén csak minimális méretű spektrális jellegzetességek figyelhetők meg. Az útburkolatok esetében jól kimutatható az öregedés: a hőmérsékleti hatások mellett anyaguk (foto)kémiai reakcióba lép a légköri oxigénnel és a napsugárzással. Ennek következtében (i) csökken bennük az olajszármazékok aránya, (ii) oxidáció lép fel és (iii) megváltozik a szerkezetük (*trixotrópia*, elfolyósodás) is. Míg az első folyamat viszonylag rövid idő alatt lezajlik, a másik kettő hosszabb távon fejti ki hatását, ami a spektrumgörbéken is kimutatható (HEROLD ET AL., 2004). A friss aszfalt rendelkezik a legalacsonyabb reflektanciával (azaz a legsötétebb), ami az öregedés során minden hullámhossz-tartományban megnövekszik. Ez az olajos komponensek távozásával és a felszín elzáródásával hozható összefüggésbe, ami növeli a fény abszorpcióját és a szennyeződések, por megkötését is. A konvex görbe alakja konkávva alakul az öregedés hatására. Az oxidációs folyamat eredményeképpen megjelennek a vas-oxid abszorpciós minimumok (520, 670 és 870 nm) is. A hidrokarbonátok elnyelési „objektumai” az aszfalt állapotának romlásával fokozatosan „kisimulnak”. A beton felületek (pl. járdák) esetében is megfigyelhetők az öregedés hatásai. A új beton felszínek mutatják a legnagyobb reflektanciát, ami az idő előre haladtával leginkább a látható és közeli-infravörös tartományban csökken le. Ez részben az oxidációs folyamatok következtében megnövekedő vas-oxid tartalommal, részben a szennyeződések (por) akkumulációja okozta besötétéddéssel magyarázható. A SWIR régióban csak minimális változások történnek, mint például az agyagásványok növekvő abszorpciója (2200 nm) (HEROLD ET AL., 2004). Érdekes megfigyelés, hogy az árnyékos felszínek reflektancia görbéin – az átlagosan alacsony értékek mellett – nemcsak a saját abszorpciós jellegzetességek fedezhetők fel, hanem a növényzetről visszaverődő sugárzás hatása is – például a vörös él, zöld csúcs vagy a vízelnyelési sávok formájában.

5) A **vízfelületeket** a látható fény visszaverése mellett az IR tartományban megfigyelhető szinte teljes abszorpció jellemzi.

6) A **sportpályák** salak borítása a vas-oxid tartalom okozta elnyelési sávokat mutatja az 520, 670 és 870 nm tartományban.

Láthatjuk tehát, hogy a felszíni anyagok reflektanciáját városi környezetben igen sok tényező befolyásolhatja. Ilyenek az objektumok fizikai struktúrája, geometriája, az anyagok öregedése, légköri hatások vagy a növényzetre rakódó szennyeződések. Ezek a hatások természetesen nem mindig mutatkoznak meg a laboratóriumi körülmények között rögzített – és spektrumkönyvtárakban eltárolt – referencia spektrumokon. Éppen ezért indokolt a referenciaadatok gyűjtése terepi (in-situ) körülmények között is. A megvilágítás a vizsgált objektum struktúrájától és geometriájától függően van hatással a reflektanciára, bár a görbe általános lefutását nem befolyásolja. Geometria alatt az objektum alakját és kitettségét (irányultságát) értjük, ami a tetők esetén például a lejtésszögben és a tájolásban mutatkozik meg. A Nap aktuális pozíciójának függvényében egyes részek így fényesebbek (magasabban futó görbe), mások árnyékosabbak lesznek.

A városi felszín szerkezeti és geometriai jellemzői mikro, mezo és makro skálán egyaránt megfigyelhetők, és hatással vannak az objektumról visszavert sugárzás spektrális tulajdonságaira. Mikro szinten a felépítő anyagok felszíni érdessége határozza meg a beérkező sugárzás visszaverődését. A kisméretű szerkezeti jellemzők – mint a cserepek mintázata vagy az utak felszínének érdessége – így hatással vannak a visszavert sugárzás tulajdonságaira. A felszínnek nagy része ún. nem-Lambert visszaverődést mutat, ami a napsugarak beesési szögével - azaz alacsonyabb napállásnál - még növekszik is. Egyes objektumok ún. forward-scattering tulajdonságúak (pl. beton, alumínium), mások inkább - diffúz visszaverő - Lambert-felszínként viselkednek, míg némelyeket – főként nagyobb felszíni érdesség esetén – erősebb backscattering jellemez. Mezo skálán az épületek és tetők 3 dimenziós struktúráját és az utak mikrodomborzat által befolyásolt kitettségét és lejtésszögét kell figyelembe venni, míg makroszinten – élénkebb domborzat esetén - az ún. topográfiai hatás érvényesülhet, melyet a felvételek radiometriai korrekciója során kell kiküszöbölni (HEROLD ÉS ROBERTS, 2010).

5.2.1.2. Szeparabilitás problémája

A városi felszínekről készült távérzékelte felvételeken egyes felszínborítások könnyen elkülöníthetők, mások azonban spektrális hasonlóságuk miatt egymással összekeverhetők. A képek kiértékelése során az egyes pixeleken tárolt spektrumgörbét - minél pontosabb illeszkedést keresve - összevetjük a spektrumkönyvtárak referencia görbéivel. A vörös cseréptetők például jól elkülönülő spektrális jellemzőkkel rendelkeznek, így az ennek referencia spektrumához hasonló pixelek minden bizonnyal ilyen borítást reprezentálnak. A növényi alapú (zsindely) tetők már mutatnak némi spektrális hasonlóságot a nem-fotoszintetizáló vegetációval, így osztályozásakor hibákkal számolhatunk. Ennél is nehezebb – a hasonló anyagok miatt - az aszfalt és kátrányos (panel) tetők elkülönítése.

A spektrális szeparabilitás (elkülönülés) kvantitatív meghatározására a hiperspektrális képfeldolgozásban leggyakrabban a *Bhattacharyya-távolságot* (B-distance) használják (JIMENEZ ÉS LANDGREBE, 1999):

$$B = \frac{1}{8} [\mu_1 - \mu_2]^T \left[\frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right]^{-1} [\mu_1 - \mu_2] + \frac{1}{2} \ln \frac{\left[\frac{1}{2} [\Sigma_1 + \Sigma_2] \right]}{\sqrt{|\Sigma_1| |\Sigma_2|}} \quad (3)$$

ahol μ_i a két vizsgált osztály átlagvektora,
 Σ_i az osztályok kovariancia mátrixai

A módszer spektrum könyvtárak referencia görbéit vagy kijelölt mintaterületek képi adatait hasonlítja össze osztályonként, és határozza meg a (gaussi) eloszlásfüggvények statisztikai távolságát. Az eredményül kapott kereszttáblában az egyes osztályok között mért átlagos és minimális B-distance értékeket tárolják. Mivel a módszer nem határoz meg egzakt határértékeket, azokat az egyes osztályok értékeinek összevetésével, relatív módon kell megadni. Ez alapján kijelölhetők a magasabb B értékekkel rendelkező, egymástól spektrálisan jól elkülönülő osztályok. Az alacsony átlagos és minimum értékek osztályozási problémákat vetítenek előre.

HEROLD ÉS TÁRSAI (2004) kaliforniai kutatásaik során a B-distance értékek alapján a legfontosabb felszínborítási kategóriák közti spektrális hasonlóságról a következő általános megállapításokat tették. (i) A zöld vegetáció, a kavicsborítású tetők és utak, valamint a vörös cseréptetők értékeikkel jól elkülönülnek a többi osztálytól. (ii) Az ellenkezők – alacsony spektrális távolságok - mondhatók el ugyanakkor az aszfaltozott utakról és parkolókról, illetve a kátrányos, a mesterséges zsindelek és szürke cseréptetőkről. (iii) A beton borítású utak osztálya a magas átlagértékek mellett alacsony minimum távolságokkal jellemezhető több kategóriához viszonyítva is. Ennek magyarázatát a beton heterogén anyagi összetételében kell keresni, ami bizonyos fokú spektrális hasonlóságot eredményez a különböző cseréptetőkkel és csupasz talajfelszínekkel. (iv) Általánosságban az utak felszíne könnyen összekeverhető néhány cseréptípussal, a talajfelszínekkel és természetesen a – csak funkciójában eltérő – parkolókkal és járdákkal. (v) A nem-fotoszintetizáló vegetáció és a növényi alapú zsindelek – bár a többi osztálytól jól elkülönülnek – egymással szintén könnyen keverhetők. A fentiekből is látható tehát, hogy a leggyakoribb városi felszínborítások egymástól sokszor csak alig különböznek el a spektrális térben. A probléma megoldására olyan felvételező rendszereket kell alkalmazni, amelyeket az elektromágneses spektrum azon tartományaiból képesek – részletes spektrumot, nagy spektrális felbontású – adatokat szolgáltatni, ahol a spektrumgörbék között a lehető legnagyobb eltérések vannak.

5.2.1.3. Legalkalmasabb spektrális tartományok

HEROLD ÉS TÁRSAI (2003) vizsgálataik eredményeként 14 olyan spektrális tartományt határoztak meg, melyek felhasználásával az – amerikai – városok leggyakoribb felszínborításai sikeresen elkülöníthetők egymástól. Ezek a sávok nagyrészt a látható fény tartományában – 5 régióban - találhatók, ahol a görbe jellegzetességeit leginkább az anyagok színe és az azt okozó keskeny elnyelési „objektumok” – mint például a vas-oxid tartalom - adják. A városi felszínek elkülönítésében tehát a *szín* – mint spektrális információ – a legnagyobb jelentőségű. A kiválasztott NIR és SWIR sávokban a növekvő reflektancia értékek közti jelentős – nagy dinamikájú - eltérések segítenek az osztályok elkülönítésében. Emellett sok helyen egybeesnek a kiválasztott tartományok a görbe egy-egy speciális „alakzatával”, ún. spektrális objektumokkal, jellegzetességekkel (spectral features). Megfigyelhető azonban, hogy a legalkalmasabbnak választott sávok általában kívül – vagy épp csak a határaitra - esnek a Landsat TM és Ikonos szenzorokban használt tartományokon. Ezek tehát nemcsak a sávok szélessége, de elhelyezkedése miatt is csak korlátozottan alkalmazhatók a városi felszín vizsgálatában. A legjobb átlagos szeparabilitást biztosító sávok a látható tartományban 420, 440, 570 és 640 nm-nél, a NIR tartományban 750, 1105 és 1315 nm-nél, míg a SWIR régióban 1990 nm-nél figyelhetők meg. Jól használhatók továbbá a 490-550 nm és 1670-1750 nm közötti régiók is. A legjobb minimális szeparabilitást az 500, 510, 2000, 2010, 2160 és 2330 nm-es sávok mellett az 550-700 nm-es régió sávjai szolgáltatják. Ezekkel olyan keskeny elnyelési „objektumok” azonosíthatók, melyet az anyagok színe és ásványai okoznak. 2000 nm környékén azonban számolni kell a légköri CO₂ és víz zavaró hatásával is. A fenti vizsgálatokat AVIRIS szenzorral gyűjtött adatokon végezték el, az általunk alkalmazott AISA Dual azonban szintén lefedi a teljes 450-2450 nm-es tartományt, így ezek a tapasztalatok számomra is hasznosíthatók voltak.

5.2.2. Spektrumkönyvtár készítése – Szeged példáján

A saját városi spektrumkönyvtár építése során Szeged különböző beépítési típusokkal jellemzett városrészein - az előre definiált felszínborítási osztálystruktúrának megfelelően – kerültek kijelölésre tanulóterületek és ellenőrzőpontok. Első lépésben az egyes tanulók belső változatosságát és a belőlük – az osztályközepek kiszámításával - létrehozott spektrumkönyvtár elemeinek egymáshoz viszonyított spektrális szeparabilitását vizsgáltam meg. Ezt követően elemeztem az egyes osztályok reflektancia görbéit és összevetettem a szakirodalomban megtalálható (HEROLD ET AL., 2003; USGS és JPL könyvtárak), illetve hazai városokban rögzített terepi spektrumokkal (VISINÉ ET AL., 2012). Az elkészült spektrumkönyvtárak a továbbiakban a különböző osztályozó algoritmusok fontos bemenő adatait képezik.

5.2.2.1. Osztálystruktúra kialakítása

A későbbi osztályozások várt kimeneteinek megfelelően – az anyagi minőség alapján – hierarchikus osztálystruktúrát definiáltam, mely nagyrészt követi a nemzetközi kategorizálásokat (HEROLD ET AL., 2004, FRANKE ET AL., 2009). A hierarchikus rendszer lehetővé teszi, hogy akár szintenként más-más osztályozási algoritmussal dolgozzunk. Miközben a magasabb szinteken komplexebb anyagi tulajdonságú kategóriák jelennek meg, melyeket inkább felszínborítási típusokként értelmezhetünk, addig a pontosabban definiált alosztályok egy-egy speciális anyagtípust reprezentálnak. Különösen a mesterséges felszínek (tetők és útburkolatok) esetében definiáltam több altípust (5.1. táblázat). Az osztálystruktúra természetesen csak egy kis részletét fedi le a valóságban előforduló felszíneknek, azonban így is jól reprezentálja a városunkban előforduló leggyakoribb kategóriákat. Jelen kutatásban a figyelem a beépített, mesterséges felszínek felé irányult, így a növényzeti és talaj típusok csak a hierarchia magasabb szintjein jelennek meg. Céлом, hogy a kategóriák tiszta pixeleit a földrajzi és/vagy a spektrális térben lehatároljam, majd reflektancia görbéikből spektrumkönyvtárat készítsek.

5.1. TÁBLÁZAT A vizsgált felszínborítások hierarchikus osztálystruktúrája

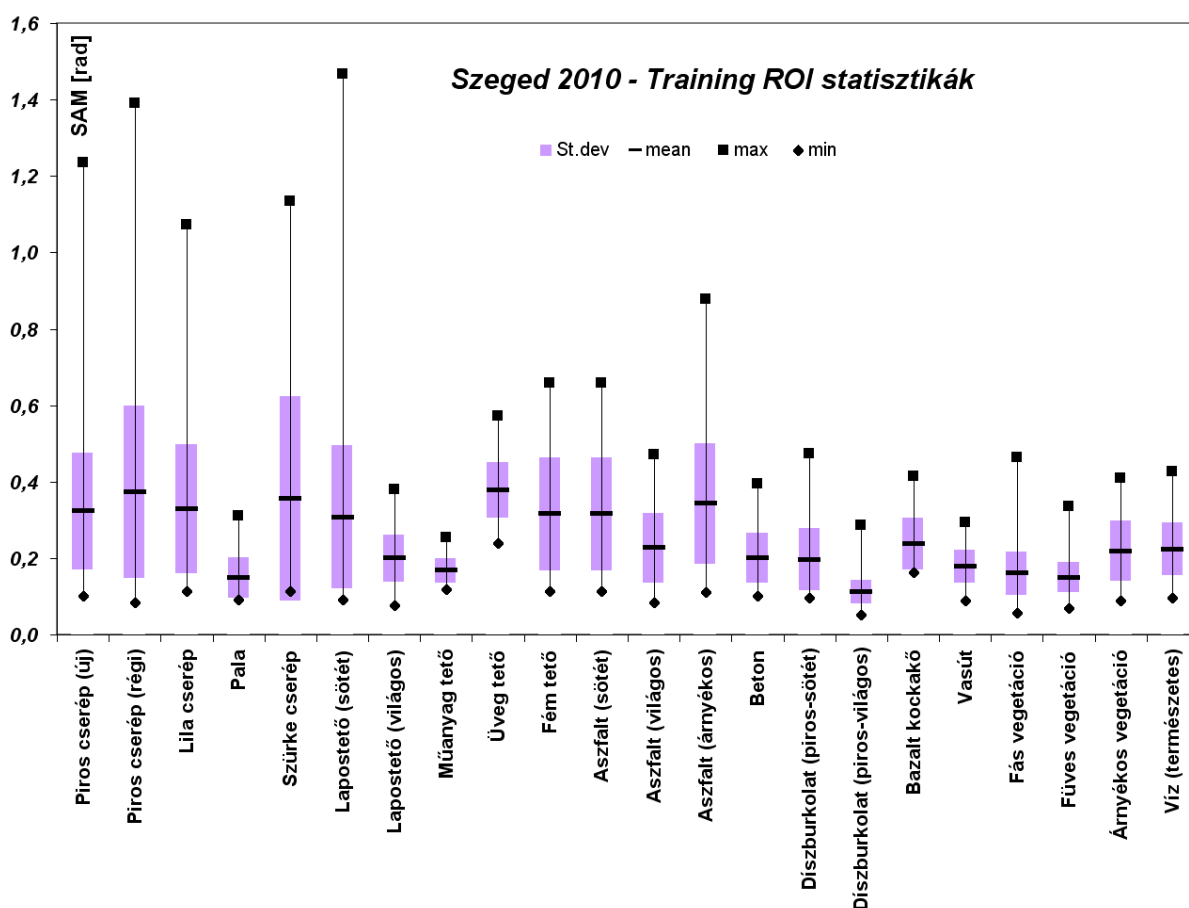
KATEGÓRIA	KATEGÓRIA	KATEGÓRIA
Beépített területek	Beépített területek	Növényzet
<i>Épületek (tetők)</i>	<i>Közlekedés területei</i>	<i>Zöld vegetáció</i>
Cserép (kül. színű)	Aszfalt	Lombos
Lapos (CH)	Beton	Füves
Műanyag (fólia)	Díszburkolat	Árnyékos
Üveg	Vasút (bazalt)	Vízfelületek
Fém		<i>Természetes</i>
Pala		

5.2.2.2. Tanulóterületek és ellenőrzőpontok felvétele

Az egyes felszínborítási kategóriák jellemző spektrumainak legyűjtése a felvételekről – földrajzi pozíciójuk alapján – poligon és pont mintákat felhasználva történt. Ehhez a nagyfelbontású RGB légifelvételt használtam fel, amit terepbejárással tovább pontosítottam. Az egyes osztályokba felvett képelemekből alapstatisztikákat számoltam (sávonkénti minimum, maximum, átlag és szórás), és a sávonkénti átlagos reflektanciák alapján spektrumkönyvtárat építettem. A mintapontok 10-15%-át az osztályozás ellenőrzéséhez referenciaként (*ground reference*) használtam fel (5/A melléklet).

5.2.2.3. Tanulók osztályon belüli változatossága

Az osztályonként kijelölt tanulóterületek pixelstatisztikáiból átlagspektrumokat számítottam, melyek a spektrumkönyvtár egyes elemeit eredményezték. A tanulóterületek képelemeinek a saját osztályközepükhöz viszonyított spektrális térbeli helyzete jól mutatja az adott tanulóterület egységességét (5.1. ábra). Minél nagyobb az adott az osztályközéptől mért átlagos szögeltérés (mean), annál változatosabb, kevésbé „tisztá” a kijelölt tanulóterület (pl. szürke cserép), ami osztályozási hibákhoz vezet. Az alacsony átlagos eltéréssel és kis szórással (St.dev) jellemezhető tanulók (pl. pala, műanyag tető, fű) jól definiáltak, így nagy osztályozási pontosságot biztosítanak (TOBAK ET AL., 2012B).



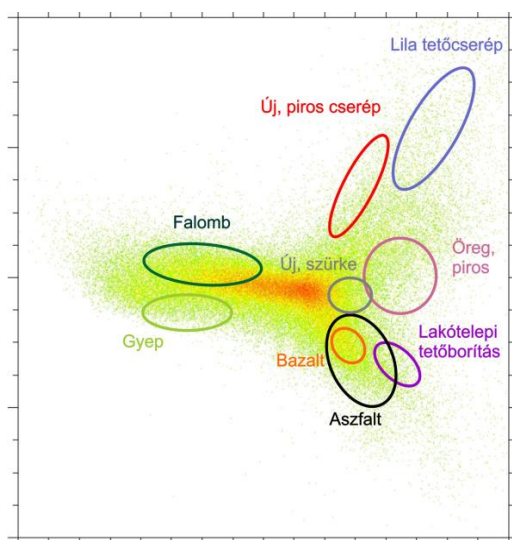
5.1. ÁBRA A tanulóterületek pixeleinek és osztályközepének spektrális szögeltérése 22 osztály példáján

A diagramon feltüntetett adatok alapján elmondható, hogy – a pala és műanyag tetők kivételével – a különböző *tetőborítások* osztályai *nagy belső változatosságot* mutatnak. A minták gyűjtése terepen nehezen megoldható, az általában többszintes épületek teteje az utcaszintről nem látható. Ezért a tanulóterületek kijelölése nagyfelbontású légifelvétel alapján történt, ami csak szín – esetenként textúra – információkkal szolgált, de nem tette lehetővé az azonos színű, de más anyagú cserepek elkülönítését. Ennek következtében eltérő spektrális tulajdonságú anyagok kerülhettek közös osztályba. A heterogén osztályok másik magyarázata a tetők geometriai sokfélesége, ami eltérő kitettséget és abból következően más-más megvilágítási viszonyokat – végeredményben eltérő reflektanciát - eredményez ugyanazon anyagok esetében is. A harmadik fontos tényező a cserepek állapota, kora, ami szinte folyamatosan változó spektrális jellemzőket eredményezhet. Így például az új és régi piros cserepek elkülönítése is csak szubjektív módon történhetett. A jól definiált osztályok esetében az alacsonyabb mintavételi pontszám (pl. pala, műanyag tetők, piros díszburkolat), illetve a kisebb anyagi változatosság (pl. növényzet) volt jellemző.

5.2.2.4. Az osztályok spektrális szeparabilitása

Ha a tanulók egymáshoz viszonyított hasonlóságát szeretnénk megvizsgálni, *grafikus* és *statisztikai* módszereket egyaránt felhasználhatunk. A spektrális tér transzformációjával csökkenthető az adathalmaz dimenziója és növelhető az osztályok spektrális távolsága. A PCA vagy MNF transzformációval optimalizált és képi zajoktól megszűrt adattérben az egy-egy osztályba tartozó pixelek – ideális elkülönülés esetén – jól definiált határokkal jellemezhető n-dimenziós térrészekben csoportosulnak. Optimális esetben az elkülönítendő osztályok a tér két kiválasztott – lehetőség szerint a leghosszabb – tengelye által definiált síkban a pontfelhő (2D *scatter plot*) szélein, egymástól elszigetelve helyezkednek el. Az egymáshoz közeli, esetleg egymást átfedő osztályok spektrálisan nehezen elkülöníthetők, nagy pontossággal – további, nem spektrális információk, pl. magasság bevonása nélkül – nehezen klasszifikálhatóak.

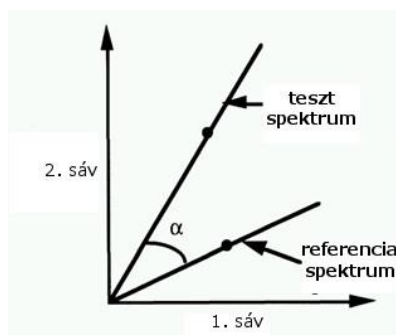
Az 5.2. *ábra* egy főkomponens analízist követően mutatja be - az 1. és 2. főkomponens tengely által definiált síkra vetítve - néhány osztály spektrális térbeli helyzetét.



5.2. ÁBRA Néhány fontosabb anyag pixeleinek elhelyezkedése a PCA transzformált spektrális térben (1. és 2. főkomponens tengelyek síkjára vetítve)

A scatter plot alakja adathalmazonként eltérő, általában azonban megkülönböztethetünk rajta három egymástól jól elhatárolható régiót: (1) az alacsony reflektanciával jellemzett (víz vagy árnyékos területek), (2) a növényzeti és (3) a mesterséges anyagokból felépülő osztályok pixeleit. A fenti kivágaton a pontfelhő 3 ágán a növényzet, az élénk (piros, lila) színű cserepek és a sötét pixelek (aszfalt, árnyék) találhatók. A legnagyobb bizonytalanságok – átfedések, keveredések – az alacsony reflektanciával jellemezhető kategóriák esetében figyelhetők meg.

A kijelölt tanulók elkülönülését statisztikai módszerekkel is értékelhetjük. Az egyes osztályok átlagspektrumait – azaz tulajdonképpen a spektrumkönyvtár elemeit – az ENVI Spectral Analyst eszközével összevethetjük, a köztük lévő spektrális hasonlóságot különböző módszerekkel – Spectral Angle Mapper (SAM), Spectral Feature Fitting (SFF), Binary Encoding (BE) – számszerűsíthetjük. Ezek közül a spektrális térben az osztályközepeket kijelölő n-dimenziós vektorok szögeltérését (SAM, 5.3. *ábra*) vizsgáltam meg részletesebben. A kisebb szögeltérések nagy hasonlóságot, a nagyobb differenciák, nagy szeparabilitást jelentenek. A módszer ugyanakkor érzéketlen a vektorok hosszára: a hasonló lefutású, de átlagos reflektanciájukban különböző – azaz eltérő fényességű – spektrumokat hasonlónak tekint.



$$SAM_{t,r} = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^n t_i^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^n r_i^2 \right)^{1/2}} \right)$$

(4)

5.3. ÁBRA A vizsgált (t) és a referencia (r) spektrumok szögeltérésének értelmezése 2 sávós felvétel esetén (balra), illetve az α szögeltérés meghatározása n felvételi sáv esetén (jobbra) (Forrás: Kruse et al. 1993)

A létrehozott spektrumkönyvtár elemeinek egymáshoz viszonyított SAM eltérései az 5.2. táblázat jobb felső részében láthatók. Az értékek relatív skálán jelzik az egyes kategóriák hasonlóságát. A nagyobb számok kis spektrális eltérést – azaz nagy hasonlóságot – jelentenek például a két növényzeti típus, az aszfalt és bazalt osztály vagy a régi és új piros cserepek között. A klasszifikáció során épp ezekben az esetekben jelentkeznek a leggyakrabban félreosztályozások. A nagy szögeltérést – a táblázatban alacsony értéket – mutató kategóriák között előforduló hibás osztályozás nem a spektrális hasonlóságra, hanem egyéb – pl. a térbeli pozícióra, szomszédságra, kitakarásra - lesz visszavezethető. Általánosságban elmondható, hogy a nagyobb hasonlóság figyelhető meg a lila és piros cserepek; a sötét tetőborítások (szürke cserép és paneltetők) és az aszfalt felszínek; illetve az aszfalt és bazalt anyagok között. Ezzel szemben a növényzeti osztályok – bár egymástól alig különülnek el – a többi osztálytól elegendő távolságra vannak. Hasonló eredményeket kapunk, ha a teljes VIS-SWIR spektrumot (400-2450 nm), és ha csak a VIS-NIR (400-950 nm) tartományt vizsgáljuk (TOBAK ET AL., 2012A).

5.2. TÁBLÁZAT A legfontosabb osztályok spektrális szeparabilitása SAM és Jeffries-Matusita távolság alapján

2010	régi piros	lila	új szürke	új piros	lakótelep	fa, cserje	fű	aszfalt	bazalt díszkő	SAM
régi piros	1	0,708	0,701	0,935	0,677	0,142	0,17	0,64	0,519	régi piros
lila	1,454	1	0,564	0,715	0,53	0	0	0,397	0,258	lila
új szürke	1,971	1,764	1	0,681	0,89	0,013	0,046	0,756	0,623	új szürke
új piros	1,677	1,592	1,985	1	0,655	0,122	0,149	0,624	0,5	új piros
lakótelep	1,964	1,963	1,973	1,999	1	0,018	0,052	0,786	0,653	lakótelep
fa, cserje	1,99	1,999	1,999	1,999	2	1	0,925	0,181	0,264	fa, cserje
fű	1,999	1,999	2	2	2	1,99	1	0,22	0,304	fű
aszfalt	1,99	1,946	1,712	1,997	1,8	1,999	2	1	0,845	aszfalt
bazalt díszkő	1,99	1,99	1,925	1,999	1,822	1,999	1,999	1,282	1	bazalt díszkő
Jeff-Mat.	régi piros	lila	új szürke	új piros	lakótelep	fa, cserje	fű	aszfalt	bazalt díszkő	VIS-SWIR

A spektrumkönyvtárban tárolt anyagok szeparabilitását a kiindulási mintapontok (ROI-k) osztályközepének spektrális térbeli távolságával is jellemezhetjük. Több távolságmérési módszer (pl. Transformed Divergence, Bhattacharyya Distance) közül a *Jeffries-Mathusita* mérési eljárás eredményeit ábrázolja az 5.2 táblázat bal alsó része. Ez esetben a spektrális

távolság ($J-M_{ub}$) meghatározása két vizsgált osztály között az alábbi képletekkel történik (RICHARDS ÉS JIA, 2006):

$$J - M_{ub} = \sqrt{2(1 - e^{-\alpha})} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{8} (\mu_u - \mu_b)^T \left(\frac{C_u + C_b}{2} \right)^{-1} (\mu_u - \mu_b) + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\frac{1}{2} |C_u + C_b|}{\sqrt{|C_u| \times |C_b|}} \right] \quad (6)$$

ahol u és b a két vizsgált tanuló osztály
 C_u az u tanuló kovariancia mátrixa
 M_u az u tanuló átlagektora
 T a transzponáló függvény

A mérések az MNF transzformált adattérben történtek. Először az első 9 – legkevesebb zajt tartalmazó - sávot (5/B melléklet jobb felső része), majd csak a 4 legtöbb információt tömörítő - 1., 3., 4. és 5. - sávot vettem figyelembe a számításnál (5/B melléklet bal alsó része). A 2.00 értékek teljes szeparabilitást jeleznek, ami 1.90-ig csökkentve még elfogadható pontosságú klasszifikációt eredményez. Ez alatt azonban már érdemes megfontolni az osztályok összevonását általánosabb kategóriákba. A táblázat alapján a problémás osztályok ismét a különböző színű (piros, lila, szürke) cseréptetők, illetve az aszfalt, beton és bazalt burkolatok.

5.2.2.5. Képi spektrumok elemzése

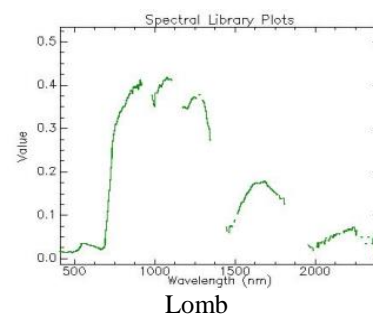
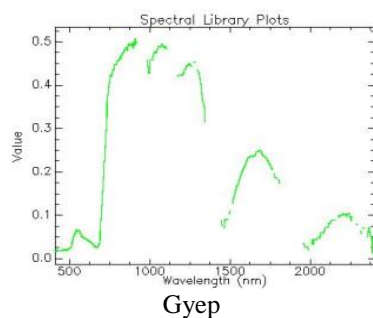
A következőkben a leggyakrabban előforduló felszínborítások és anyagok tanulóterületek alapján rögzített spektrumainak elemzését mutatom be, hangsúlyozva a fontosabb spektrális jellegzetességeket (*spectral features*), és összevetve azokat más könyvtárak (terepi ASD és képi AVIRIS spektrumok (HEROLD ET AL., 2003), illetve USGS¹¹ és JPL¹² Spectral Library) adataival.

Növényzet

Az általános tulajdonságok közül megfigyelhető az 550 nm körüli reflektancia csúcs, illetve az azt határoló nagyobb kék és vörös elnyelés. Vörös él meredeksége és magassága a lombos és füves területeken hasonló mértékű (2-3% → 40-50%), melyet azonban az árnyékhátas és az egészségi állapot jelentősen befolyásolhat. A közeli infravörös tartomány vízelnyelési sávjai közül a 980 nm környéki a szenzor belső zaja miatt csak részben detektálható. 1200 és 1400 nm-nél jól megfigyelhető a nagyobb abszorpció, míg 1900 nm-nél már elnyomja azt a jelentős légköri elnyelésből származó zaj. A lignin és cellulóz okozta minimumok közül csak a 2300 nm-es figyelhető meg a képi spektrumokon (5.4. ábra, 6/A melléklet).

¹¹ <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/>

¹² <http://speclib.jpl.nasa.gov/search-1/manmade>



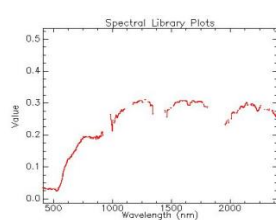
5.4. ÁBRA Növényzeti spektrumok Szeged, Mátyás-térről

Csupasz talajfelszínek

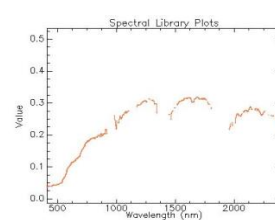
A felvételezett területeken nagyobb kiterjedésű, borítás nélküli talajfelszínnel nem találkozhatunk. Az 1,5 méteres terepi felbontás megnehezíti a tiszta talaj pixelek azonosítását. A családi házas mintaterületeken a felvételezés idején főlías vagy szabadtéri konyhakerti növénytermesztés folyt, a pixeleken a növényzeti és talaj spektrumok keveredése volt várható. Az elhanyagolható területi arány miatt csupasz talajfelszín osztályt a spektrumkönyvtárban nem definiáltam.

Tetőborítások

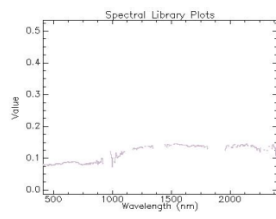
A városi környezet legváltozatosabb felszínborításait a különböző tetők jelentik. Ezek mind anyagukban, mind – reflektanciát szintén befolyásoló – mintázatukban nagyon sokfélék. Ehhez társul meg a különböző kitettségből következő eltérő megvilágítás. Ennek megfelelően nagy kihívást jelent a minél teljesebb könyvtár összeállítása. Az anyagukban hasonló, de különböző színű **cserepek** görbeinek lefutása – az intenzitásbeli különbségektől eltekintve – a közeli és közepes infravörös tartományban hasonló volt. Jelentősebb eltéréseket a látható spektrumon figyelhettünk csak meg, amit a különböző színezés eredményezett. Növényzeti keveredésre utaló elnyelés mutatkozik minden cseréptípusnál 1400 és 1900 nm környékén. Ezt a jelenséget a terepi módszerekkel rögzített – tisztább – spektrumokon nem figyelhetjük meg. Az általánosan jellemző vas-oxid elnyelés 520 és 870 nm-nél azonban minden esetben szépen megmutatkozott (5.5. ábra, 6/B melléklet).



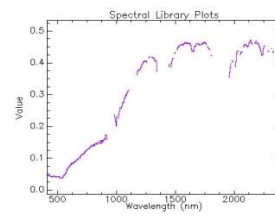
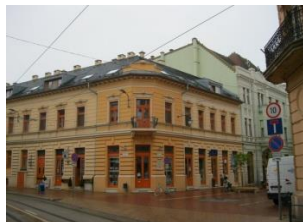
Új piros cserép



Régi piros cserép



Szürke cserép



Lila cserép



5.5. ÁBRA Cserép tetőborítások spektrumai Szeged, Belvároshól és Alsóvároshól

Az egyéb – **nem cserép** – tetők közül a főlíasátrakat és üvegházakat, valamint a pala és fém tetőket vizsgáltam meg. Ezek közül a műanyag és fémborítások magukban is igen

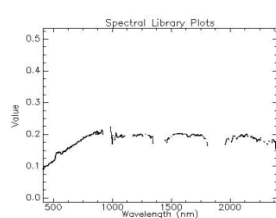
heterogén kategóriákat képviselnek. A fóliasátrak spektrumán a növényzeti görbe jellegzetességei tükröződnek (pl. vörös él, vízelnyelési sávok), az üvegfelületek pedig egyenletesen alacsony (~10%) reflektanciát mutatnak. A fémborítás osztály sajnos nagyon heterogén pontokból állt össze, így a görbe lefutásából értékelhető következtetéseket nem vonhatunk le. A palatetők spektruma folyamatosan növekvő reflektanciát mutat az infravörös tartományok felé (6/C melléklet).

A harmadik nagy tetőborítási csoportot a **panel és téglablokkos épületek** jelentették. Ezek anyagukban nagyon hasonlóak az útburkolathoz, melyek azonban helyzetüknél fogva – magassági információk alapján – viszonylag könnyen elkülöníthetők. A görbe lefutásában az általánosan alacsony (10-20%) értékek mellett az infravörös tartományok felé csökkenő reflektancia figyelhető meg, ami ellentétes a – látható sávokban még hasonló – szürke cserepekkel.

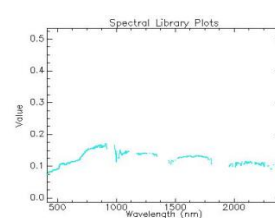
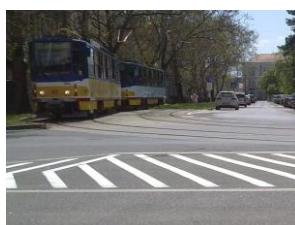
Útburkolatok

Az útburkolati anyagok közül az **aszfaltot** és a **betont** vizsgáltam. A képi spektrumokon 1200, 1500 és 2000 nm környékén megfigyelhetők ugyan helyi minimumok – melyek részben korrelálnak a növényzettel –, de összességében sok spektrális jellegzetességet nem találhatunk. A terepi (ASD) spektrumokon 2300 nm-nél látható abszorpció esetében egyáltalán nem jelent meg sem az aszfalt, sem a beton mintában (6/D melléklet).

Az egyéb burkolatú felszínek közül a **díszburkolatokat** elemeztem. A görbék lefutása a piros cserepekkel mutat legnagyobb hasonlóságot, a megvilágítási viszonyoktól függően attól eltérő intenzitással. **Bazalt** kockakövekkel a város több pontján találkozhatunk. Ezek spektruma kb. 1000 nm-ig fokozatosan növekvő, majd onnan – a cserepeknél és díszburkolatoknál megfigyelt minimumokkal – csökkentő reflektanciát mutat (20% → 10%) (5.6. ábra, 6/E melléklet).



Aszfalt



Bazalt térkő



5.6. ÁBRA Aszfalt és díszburkolatok spektrumai Szeged, Belvárosból és Alsóvárosból

Vízfelületek

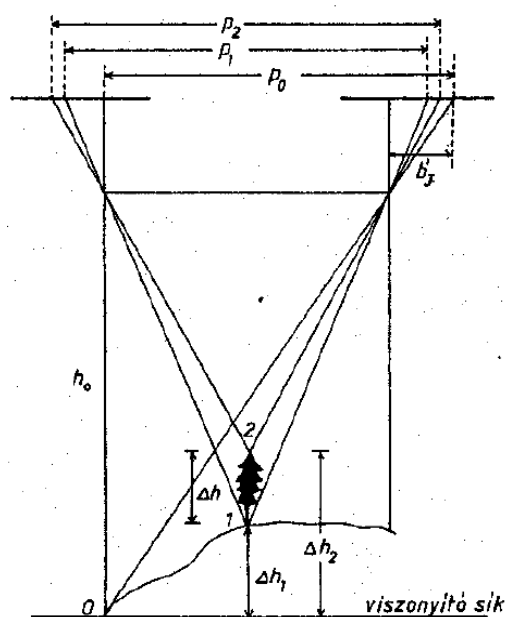
A mintaterületeken csak természetes vízfelületeket találhatunk megfelelő kiterjedésben. Ezek reflektanciája minimális, csak a látható fény tartományban mutatnak 3-5%-os visszaverést, ami a valós színes kompoziton zöldes árnyalatokban jelenik meg. Mesterséges vízfelületek, azaz festett medencék csak néhány pixel kiterjedésben találhatók az alsóvárosi családi házak némelyikében, ezeket azonban nem vizsgáltam.

Az általam kijelölt, jellegzetes városi felszínborító anyagok reflektancia spektrumainak vizsgálata alapján elmondható, hogy egyesek mind belső, mind egymáshoz viszonyított szeparabilitásukat tekintve homogének és jól definiáltak, mások azonban már most osztályozási problémákat vetítenek előre. Az egyes reflektancia görbéken legtöbb esetben megfigyelhetők az adott anyagra jellemző, más spektrumkönyvtárak alapján ismert jellegzetességek.

5.3. Magassági információk kinyerése a sztereo RGB felvételekből

A kisgépes felvételezés tervezésekor a repülési nyomvonalakat és a képközéppontokat úgy jelöltem ki, hogy a szomszédos képek között min. 60%-os, a képsorok között pedig min. 20-30% átfedés legyen. Ennek egyik célja a felvételek közötti hézagok kiküszöbölése, a másik a területek több nézőpontból történő felvételezése. Ez utóbbi lehetővé teszi a több képen is megjelenő felszíni pontok vagy objektumok magasságának kiszámítását.

A sztereoszkópikus látás szabályai a légifényképezés felvételi eljárásaira is kiterjeszthetők. Ennek alapja, hogy adott tárgyról a bal és jobb szemünk retináján – vagyis az egymást követő felvételeken - eltérő kép keletkezik. A képek megfelelő pontjainak eltérését görög eredetű szóval *parallaxis*nak nevezzük. Az egészséges emberi szem csak a szembázissal párhuzamos *bázisirányú* parallaxisokat tudja érzékelni, az arra merőleges ún. *harántparallaxis*okat nem. A légifelvételezés egymást követő képei szintén bázisirányú parallaxisokat tartalmaznak. Ha a parallaxisokat tartalmazó képeket egyidejűleg, valamilyen módon szétválasztva szemléljük, agyunkban létrejön a terület térbeli modellje. Az egymást átfedő képpár a lefényképezett tárgy két különböző centrális vetületét adja, ezért a radiális irányban jelentkező magassági torzulás a két képen különböző nagyságú. A kétképes kiértékelésben ez a bázisirányú parallaxisok eltérésében jelentkezik. A parallaxiskülönbségből a repülési magasság és a képi bázis – azaz a szomszédos képek megfelelő pontjai távolságának - figyelembevételével a tárgy magassága meghatározható (5.7. ábra) (BÁCSATYAI ÉS MÁRKUS, 1992).



ahol:

0 – az első felvétel felszíni középpontja

1 – az objektum talppontja a felszínen

2 – az objektum teteje

h_0 – repülési magasság a viszonyító síkhoz képest

Δh – 1. pont magassága a viszonyító síkhoz képest

Δh_2 – 2. pont magassága a viszonyító síkhoz képest

Δp_1 – 0 és 1 pontok között mért parallaxisok (p_0, p_1) különbsége

Δp_2 – 0 és 2 pontok között mért parallaxisok (p_0, p_2) különbsége

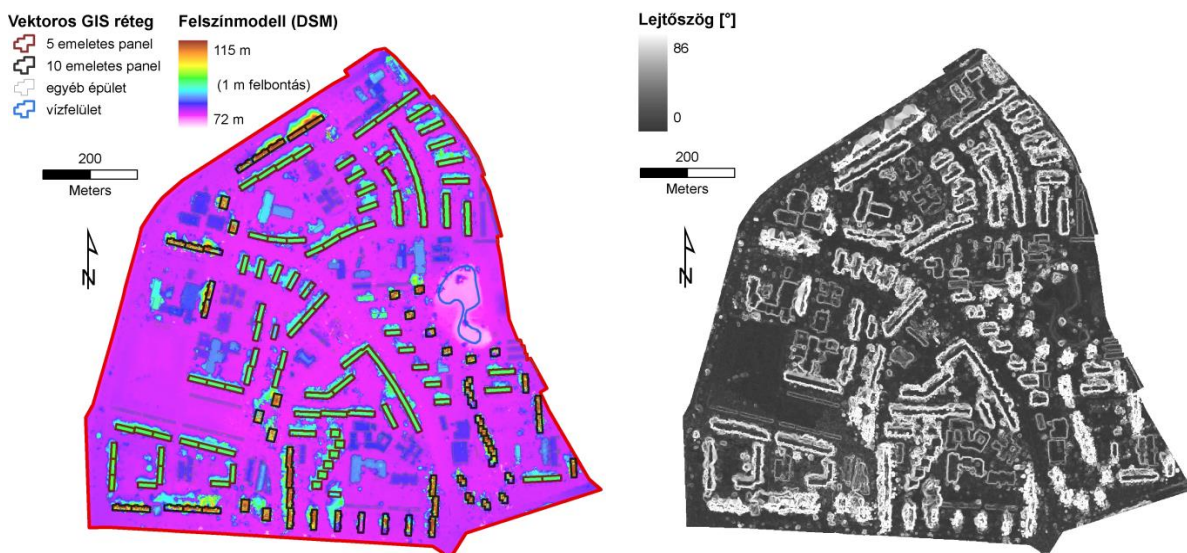
b'_x – képi bázis

$$\Delta h = \Delta h_2 - \Delta h_1 = \frac{h_0 \cdot \Delta p_2}{b'_x + \Delta p_2} - \frac{h_0 \cdot \Delta p_1}{b'_x + \Delta p_1} \quad (7)$$

5.7. ÁBRA Felszíni objektum magasságának (Δh) meghatározása sztereo légifelvételek alapján
(Forrás: BÁCSATYAI ÉS MÁRKUS, 1992)

A manuális magasságmérést természetesen a megfelelő szoftveres eljárásokkal helyettesíthetjük. Az ERDAS Imagine LPS (*Leica Photogrammetry Suit*) csomagjával a felvételezési blokk összeállítása és kiegyenlítése mellett lehetőség van a kapcsolópontokkal egymáshoz és a felszíni koordináta rendszerhez illesztett képek átfedő területein a magasságok meghatározására. A 4.4.4. fejezetben már említett külső tájékozást követően a szoftver automatikusan keresett közös képi pontokat. Az algoritmus futása során megadott méretű keresőablakkal pásztázta végig az átfedő képrészleteket azonos mintázatok után kutatva. A mintaterületenként végrehajtott művelettel több száz ún. kapcsoló (*tie*) pont került

definiálásra. A klasszikus felszín kinyerési eljárással (Classic ATE – automatic terrain extraction) előbb raszteres DEM formátumú felszínt generáltam – a számítási idő optimalizálása érdekében – 1 méteres cellaméretekkkel, majd a szabálytalan térbeli eloszlású vektoros 3D pont állományból 15 cm-es felbontású felületet interpoláltam. Az apriori információkat is felhasználó adaptív módszer – az RTK-val mért felszíni pontok visszaellenőrzése alapján – nem növelte a felszín megbízhatóságát, így azt kikapcsolva futtattam le az algoritmust. Hasonlóképpen az előre definiált stratégiák – mint például a *low urban* – sem javítottak a pontosságon. Ezek hatékonyságát nagyban megnövelték volna a területről rendelkezésre álló egyéb magassági információk. A létrejött felületmodellek és az abból levezetett térképek egy-egy példája látható az 5.8. és 5.9. ábrán.

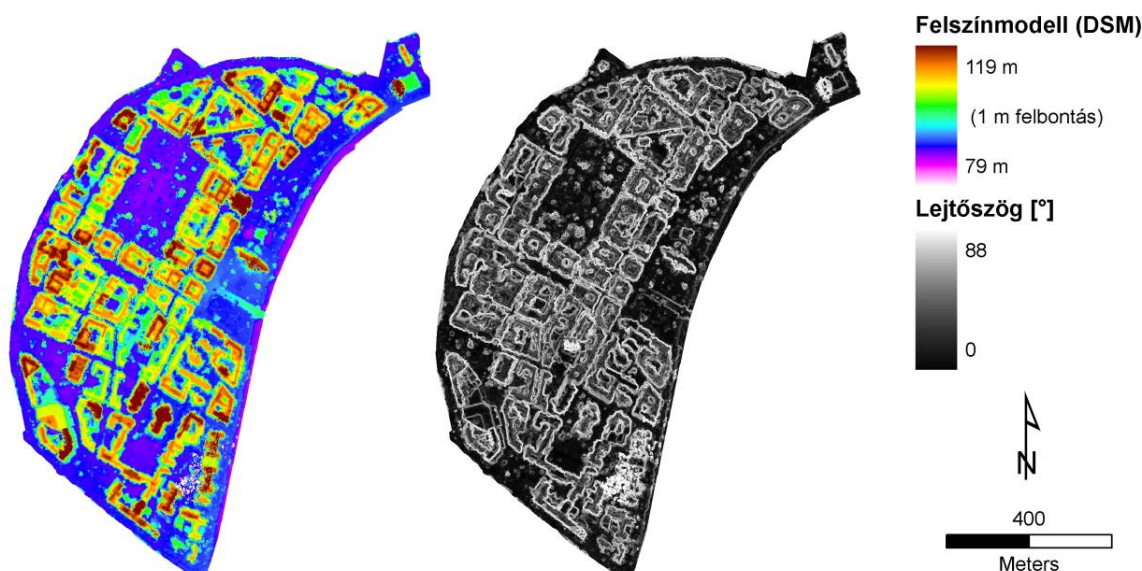


5.8. ÁBRA A tarjáni mintaterület digitális felületmodellje (DSM) (balra) és lejtőszög térképe (jobbra)

A modellel kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy - a városi környezetre jellemző geometriai viszonyok miatt (pl. függőleges falak) - az elvileg nem tekinthető matematikailag folytonos felületnek, így az abból levezetett lejtőszög térkép sem lenne értelmezhető. A feldolgozó szoftver azonban olyan felületmodellt generál, amely minden X,Y pozícióban csak egyetlen magassági Z értéket tartalmaz, így az matematikailag folytonosnak tekinthető.

A változatos geometriával – 5 és 10 szintes panel épületekkel – tarkított mintaterület felszínmodelljén a nagy magassági különbségeknek köszönhetően szépen kirajzolódnak az épületek. A talajfelszín 79 m körüli szintjéből átlagosan 14 méterrel emelkednek ki az 5 emeletes blokkok, kb. 30 méterrel pedig a 10 szintes panelek. Az első derivált értékek nemcsak az épületkörvonalakat emelik ki, de magasabb értékekkel láthatóvá teszik az épületek által vetett árnyékokat és a környező vegetációt is (5.8. ábra).

A Belvárosban – az 1879-es árvíz utáni feltöltések következtében - már 1-2 méterre magasabb a talajfelszín (80-81 m). Az épületek közül csak néhány emelkedik ki jelentősebben a környezetéből: a Dóm, a Somogyi Könyvtár, a Gyógyszerésztudományi Kar vagy a Nemzeti Színház épületének pixeljei 105-115 m értékeket vesznek fel. Az első derivált értékek ez esetben is kijelölik az épületek körvonalait, de a lakótelepeken jellemző lapos tetők – azaz homogén foltok – helyett itt ferde tetőfelszínek és tetőgerincek rajzolódnak ki (5.9. ábra).



5.9. ÁBRA A belvárosi mintaterület digitális felületmodellje (balra) és lejtőszög térképe (jobbra)

A számított magassági felszínek megbízhatóságáról és pontosságáról egzakt adataim nincsenek, az RGB felvételek tájékoztatóhoz felhasznált felszíni illesztőpontok közül csak 2-3 esett a vizsgált területekre. Környezetükben a modell magassági értékei ezekkel jól korrelálnak. A modell relatív pontosságát a vektoros épület adatbázis alapján becsülhetjük (5.3. táblázat).

5.3. TÁBLÁZAT Átlagmagasságok a referencia réteg zónáiban (ld. 5.5.1.1. fejezet) és a vektoros épület poligonokban (zárójelben) mintaterületekre lebontva, illetve az osztályozásoknál használt magassági küszöbérték (ld. 5.6. fejezet)

tszfm [m]	Alsóváros	Belváros	Tarján	(épület típusok)
út / talaj	82.28	85.61	80.83	(1 szintes : 81,08)
vegetáció (CIR)	81.98	84.63	80.81	(5 szintes : 93,47)
épület (vektor)	87,79 (83,96)	97,07 (94,81)	91.21	(10 szintes : 101,89)
út / tető küszöbérték	83 m	92 m	82 m	

A CIR és TIR légifelvételzés is megfelelő mértékű átfedésekkel történt, így elvileg azokból is nyerhetők ki magassági információk (VAN LEEUWEN ET AL., 2009A). Annak pontossága azonban – mind vízszintes, mind függőleges értelemben – a képek kisebb térbeli felbontásából és a felvételezés módszeréből következően nem érné el az RGB adatokból levezetettét.

A mintaterületenként előállított felszínmodell raszteres formátumban áll rendelkezésre, és mint ilyen a különböző osztályozások során a spektrális sávok mellé csatolható, kiterjesztve a vizsgált adattér dimenzióját és növelve a klasszifikáció pontosságát. A magassági információk elsősorban a spektrálisan hasonló, de függőleges térbeli helyzetükben jelentősen különböző osztályok – mint például az aszfalt útburkolatok és a panel tetők – elkülönítését segítik.

Jelen kutatás tárgyán túlmutatóan meg kell jegyezni, hogy a magassági információk kinyerésével párhuzamosan a sztereó képpárokon automatikusan mért magasságú pontok osztályba sorolhatók. Az épület és vegetáció objektumokat geometriai és spektrális

paraméterek alapján címkézhetjük fel, figyelembe véve többek között a felületmodellből számított lejtőszöget, az objektumok minimális és maximális méretét és átlagos magasságát. A vegetációt a rendelkezésre álló spektrális sávok alapján vegetációs indexek segítségével különíthetjük el.

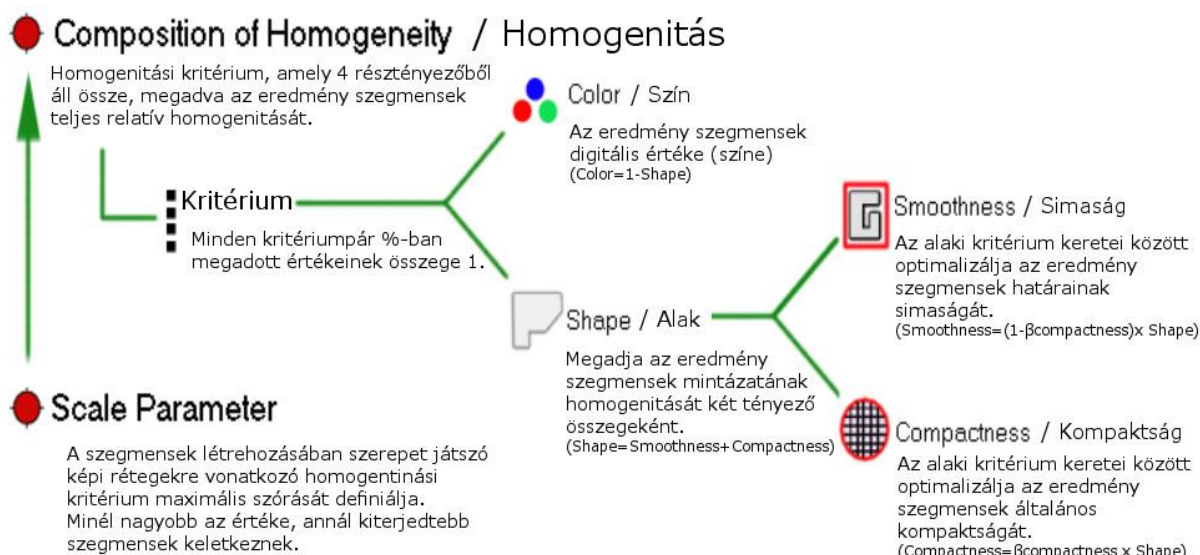
5.4. Szegmentálási lehetőségek a nagy térbeli felbontású adatokon

A nem spektrális képi információ kinyerésének legszélesebb körben alkalmazott módja a képszegmentálás. A különféle algoritmusokkal megvalósított folyamat során a képelemekből (pixelekből) – azok összevonásával – magasabb hierarchia szintű képi objektumok jönnek létre. A szegmentáció olyan optimalizációs eljárás, melynek során a cél az egy objektumhoz tartozó pixelek heterogenitásának minimalizálása, homogenitásának pedig maximálása. A műveletek több képfeldolgozó szoftverben (ERDAS Imagine, IDRISI Taiga) is elérhetők. Jelen kutatásban az eCognition-t alkalmaztam, ami az objektumalapú képosztályozás teljes műveletsorához – a szegmentálástól az objektumok osztályzásáig – gazdag eszköztárat kínál. A szegmensek kialakítására több algoritmus áll rendelkezésünkre, melyek közül kutatásom során a *multiresolution* eljárást alkalmaztam.

Multiresolution segmentation

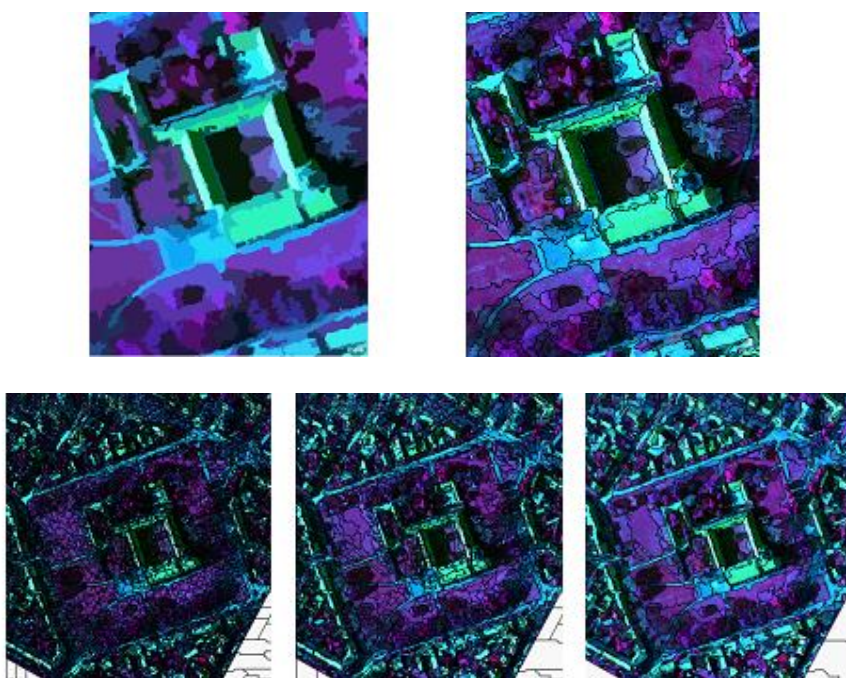
Alulról felfelé építkező – ún. bottom-up – optimalizációs eljárás, amely az egyes képelemek összevonásával olyan objektumokat hoz létre, melyek belső heterogenitása minimális, homogenitása pedig maximális. A homogenitási kritérium spektrális és alaki jellemzőket egyaránt magában foglalhat. A feldolgozási folyamat során a vizsgált képi objektumot – pixelt vagy szegmenst – azzal az objektummal vonja össze, melyhez – a homogenitási kritérium alapján – kölcsönösen legjobban illeszkedik (*mutual-best-fitting*). Amennyiben ez a viszony nem kölcsönös, a vizsgálat folytatódik a legjobban illeszkedő objektumból kiindulóan. Adott objektum szinten minden elemet csak egyszer vet vizsgálat alá az algoritmus. Az iterációk addig folytatódnak, amíg a megengedett objektum homogenitási határ túllépése nélkül lehetséges objektum összevonás. Bár nagy számítási igényű, a különféle szegmentációs algoritmusok közül ez szolgáltatja a valósághoz legjobban közelítő megoldást (TRIMBLE, 2012).

Az objektumokon belüli, maximálisan megengedett heterogenitás mértékét a *scale* paraméterrel állíthatjuk, amely így hatással van az objektumok méretére is. Az objektum homogenitás – vagy másként fogalmazva a minimalizált heterogenitás – három tényező eredőjeként definiálható. A *szín* (Color) és az *alak* (Shape) közül általában az elsőnek van nagyobb súlya a számításban. A spektrális (szín) információk mellett abban az esetben lehet nagyobb szerepe a térbeli (alaki) információknak, ha az egyes objektumok spektrálisan hasonlóak, textúrájukban viszont eltérőek. Az alaktényezőt a *simaság* (Smoothness) és *kompaktság* (Compactness) tulajdonságokkal írhatjuk le (5.10. ábra).



5.10. ÁBRA Az objektumok homogenitását befolyásoló tényezők kapcsolatrendszere (Forrás: TRIMBLE, 2012)

A szegmentációt különböző scale, shape és compactness beállításokkal futtathatjuk, keresve az optimális paraméterezést, amely az általunk felhasznált adatok spektrális és térbeli felbontásához igazodva a legpontosabban visszaadja a számunkra érdekes objektumok (épületek, lombkoronák, stb.) határait (5.11. ábra).



5.11. ÁBRA Multiresolution szegmentáció eredménye (fent balra) és az objektumhatárok (fent jobbra) a ferences templom és kolostor CIR felvétele alapján (scale: 50, shape: 0.1, compactness: 0.5), illetve különböző (10-20-50) scale paraméterrel futtatott multiresolution szegmentációk eredményei a Mátyás-tér környékén (lent)

5.4.1. A képi objektumok (szegmensek) osztályozása spektrális és térbeli jellemzők küszöbértékei alapján

A *mutiresolution* szegmentációval meghatározott képi objektumok felszínborítási osztályokba sorolására két módszert alkalmaztam. Az elsőben kiválasztott – elsősorban spektrális – objektum tulajdonságok (*feature*-ök) küszöbértékeinek vizsgálatával, hierarchikus döntési fát építve lépésről lépésre növeltem az osztályok számát. A másik megközelítésben mintaterületek (objektumok) kijelölésével – ismét csak kiválasztott objektum tulajdonságok alapján – a tulajdonságtérben határoltam le a képi objektumok osztályait. Így a hasonló objektumok közös osztályba kerültek besorolásra.

Az *épület* objektumok címkézése (osztályba sorolása) során az alábbi szempontokat vehetjük figyelembe (TRIMBLE, 2010):

- spektrális tulajdonságaik nem inkonzisztensek (különböző anyagú tetőborítások);
- alaki tulajdonságaik részben inkonzisztensek (változatos alak és méret, de a többi objektumhoz viszonyítva viszonylag nagyobb méretűek és szögletesebbek lehetnek);
- kapcsolati (kontextus) tulajdonságaik következetesek (általában árnyék kapcsolódik hozzájuk, illetve növényzettel csak ritkán borítottak);
- magassági tulajdonságaikról elmondható, hogy magasabbak, mint környezetük és meredek élekkel rendelkeznek.

A *vegetációs* foltokat az alábbi paraméterek alapján különíthetjük el környezetüktől (TRIMBLE, 2010):

- spektrális tulajdonságaik konzisztensek, a reflektancia görbe lefutása jellegzetes, ami különböző vegetációs indexek használatát teszi lehetővé;
- alakjuk változatos, de a nagyobb parkok esetében az átlagnál jellemzőbbek a nagyméretű, kerekded objektumok, így az alaki (*shape*) paraméterek hasznos információkkal szolgálhatnak;
- magasságuk több szintre tagolható: a füves vegetáció a talajfelszínnel egy magasságban található, míg a fásszárú növényzetet 1-2 méteres cserje- és 10-15 méteres relatív magasságú lombkoronaszint jellemzi.

Az *útburkolatokat* elsősorban a következő tulajdonságok jellemzik (TRIMBLE, 2010):

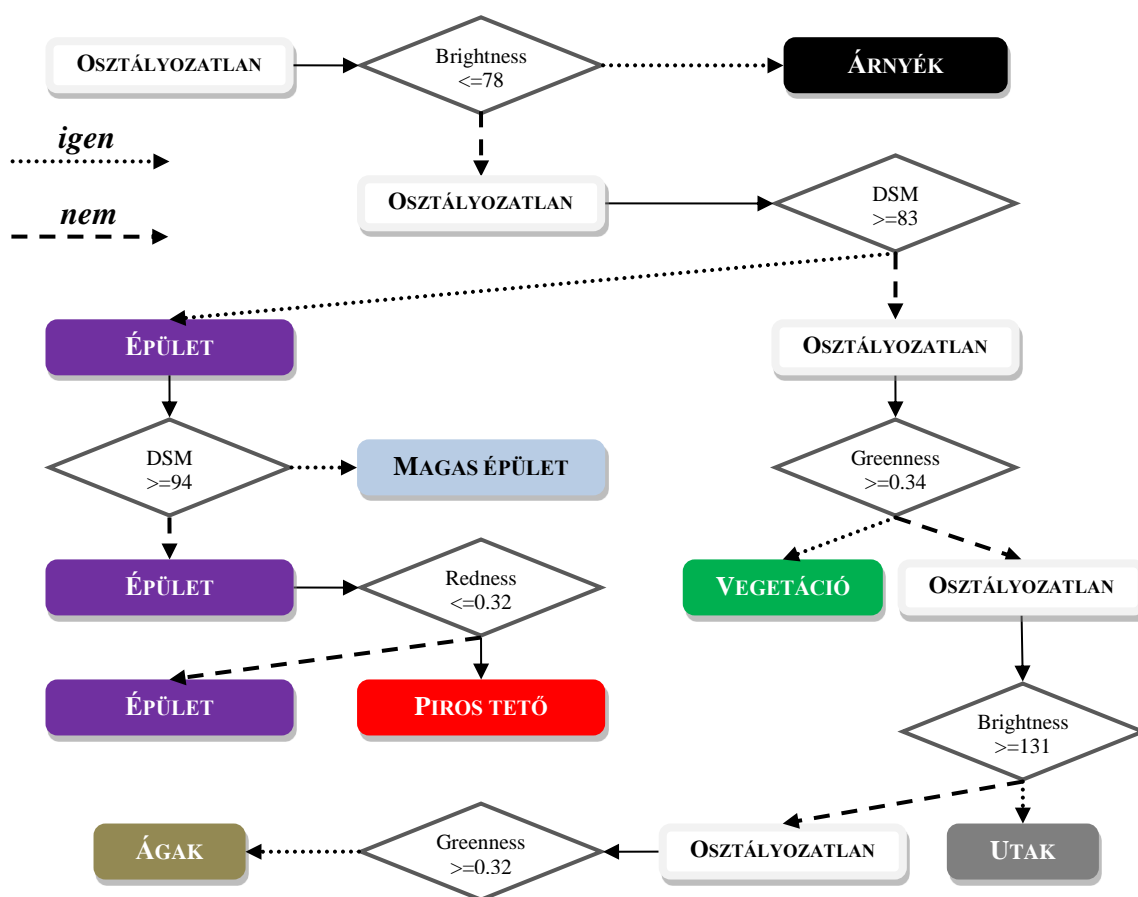
- spektrális értelemben homogének, azonban nehezen elkülöníthetők bizonyos tetőborításoktól;
- az árnyékhatás jelentős lehet;
- alakjuk legtöbbször keskeny, hosszan elnyúlt;
- gyakran növényzettel fedettek;
- magasságuk a talajfelszínnel megegyező, ami segít az épületektől történő elkülönítésben.

A szegmentációt a legnagyobb geometriai információtartalommal bíró RGB felvételek alapján végeztem el 25-50-100-200 *scale* faktorial, 0,1 *shape* és 0,5 *compactness* paraméterezéssel. A teljes projekt mellett a CIR adatok 1-3 sávjait, az MNF transzformált hiperspektrális állományt (1-8 sáv) és a 15 cm-es felbontásra interpolált felszínmodellt is tartalmazta. A nagyfelbontású RGB képeken az egyedi épületek elkülönítéséhez elegendőnek találtam a 200-as homogenitási küszöbérték. Ezen a szinten egyedül az árnyékos területeken

(út, tetők és növényzet esetében egyaránt) figyelhető meg többször hibás lehatárolás (TOBAK ET AL. 2013).

Az árnyékos térszínek lehatárolása és kizárása (maszkolás) a későbbi feldolgozásból indokolt lehet. Ezt azonban nagyban megnehezítik az eltérő felvételezési állapotok. A nap különböző szakaszaiban készült légifelvételeken az árnyékok ugyanis más-más irányba vetülnek. Az objektumok osztályozása során mindig definiáltam külön árnyék kategóriát, melynek tartalma azonban függ a szegmensek lehatárolásához felhasznált adatrétegektől.

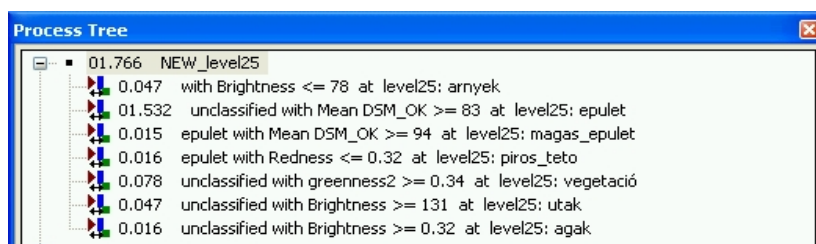
Az objektumtulajdonságok alapján épített döntési fa legfelső szintén, azaz első lépésként az árnyékos területeken határoztam le (5.12. ábra). Ezt követően a – sztereó légfelvételekből származó – felületmodell (DSM) alapján a talajszintből jelentősen kiemelkedő objektumokat az összevont „épület” címkével láttam el. A három vagy többszintes épületeket – pl. panel blokkok – egy újabb magassági küszöböt definiálva különítettem el. A továbbiakban spektrális információkat felhasználva („Redness” és „Greenness” indexek) kiszűrtem a piros cseréptetőket, illetve a talajfelszínről a – főként füves – vegetációt. A lombkoronák azonosításában a magassági értékek nagyobb szórása lehet segítségünkre. Az alkalmazott pontgyűjtési módszer azonban nem szolgáltatott megfelelő sűrűségben magassági információkat ezeken a részeken, így az interpolációval ezek a felületek gyakran „kisimultak”. A lombfakadást megelőzően a fás vegetációt az ágaik által vetett árnyékok alapján sikerült lehatárolni. A talajfelszínből a látható tartomány világosságát (Brightness) küszöbölve nyertem ki az útburkolatokat (5.13. ábra).



5.12. ÁBRA Képi objektumok (szegmensek) osztályba sorolásának döntési fája

A fenti osztályba sorolás alapján az *épületek* vektoros referencia zóna 91%-a esik a nem talajszintű szegmensekre, illetve megfordítva: a 83 méternél magasabb térszínek 56% található az épületek referencia zónában. A fennmaradó területek egy rész – a felvételezés kora tavaszi időpontjában már – lombos vegetáció, a maradék pedig hibásan mért vagy

interpolált árnyékos felszín. A lombfakadás előtt álló fákat nem sikerült magasságuk alapján helyesen kategorizálni a korábban már említett magasságmérési és interpolációs problémák miatt. A 3 vagy többszintes épületeket egy újabb magassági feltétellel ($DSM \geq 94$ m) határoltam le.



5.13. ÁBRA Az objektumok osztályba sorolásának szabályrendszere az eCognition-ben

A különböző színű tetők közül legegyszerűbben a piros cserepek térképezhetők. A vörös tartományban mért intenzitás és a három látható felvételi sáv összintenzitását egymással arányba állítva („redness” index) az „épület” kategórián belül a 0.32-nál nagyobb értékek jelölik ki a különböző árnyalatú piros cseréptetőket (5.14. ábra).



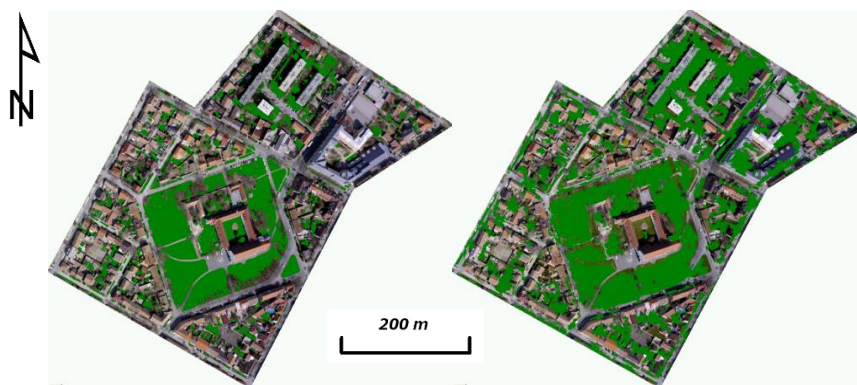
5.14. ÁBRA A piros tetők elkülönítése az épületek kategórián belül

A növényzet lehatárolásában a Greenness index segített. Ezt a látható fény tartományban készített légifelvételek kék (B), zöld (G) és vörös (R) sávjainak alábbi kombinációjából számítottam ki:

$$\text{Greenness} = (G/(R+G+B)) \quad (8)$$

Mivel a képek lombfakadás előtt készültek, a lombhullató fák ezzel a módszerrel nem azonosíthatók. A füves területek lehatárolása azonban – vizuális értékelés alapján – nagy pontosságú. A vegetációval borított szegmenseket tapasztalataim alapján 0.34-nél nagyobb greenness érték jellemezte.

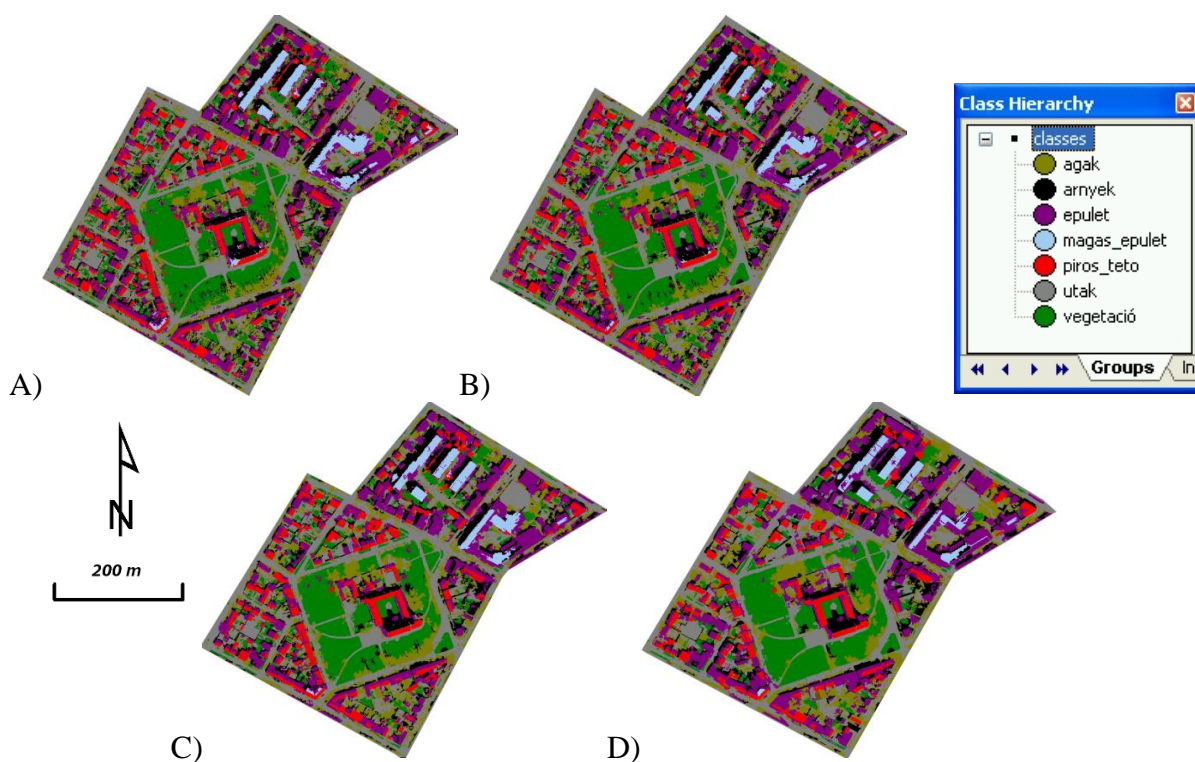
A CIR állományok közeli infravörös (NIR) és vörös (R) sávjaiból NDVI index számítható, amely azonban a felvételezés nagyobb geometriai pontatlansága miatt kevésbé megbízható eredménnyel szolgál. A nagy kiterjedésű parkok egészét magában foglaló, 0.29-nél nagyobb értékek esetén az útburkolatok egy – legtöbbször lombkoronával fedett- része is vegetáció kategóriába esik, azonban ily módon pontosabban azonosíthatók a vegetáció árnyékos foltjai is (5.15. ábra).



5.15. ÁBRA A vegetáció lehatárolása RGB felvételen (balra) Greenness index ($\geq 0,34$) és CIR adatokon (jobbra) NDVI index ($\geq 0,29$) alapján

A fent bemutatott lépéssort a 25, 50, 100 és 200 scale beállítással létrehozott objektum rétegen egyaránt lefuttattam. Az eredmény térképeket az 5.16. ábrában foglaltam össze.

A különböző szegmens méretekkel elvégzett osztályozások pontosság ellenőrzése referencia szegmensek alapján történt meg (8/A. melléklet). Ez alapján elmondható, hogy a eredeti geometriát legjobban közelítő (scale=25) objektumok esetében is 80% feletti pontosság érhető el a vizsgált 7 osztály esetén.



5.16. ÁBRA Küszöbértékeken alapuló osztályozás eredményei 25 (A), 50 (B), 100 (C) és 200 (D) scale paraméterrel létrehozott szegmensek esetében

Végezetül fontosnak tartom megjegyezni, hogy a fent vázolt hierarchikus címkézési eljárásban alkalmazott küszöbértékek empirikus megfigyelés eredményei, így más input adatokon nem minden esetben használhatók hasonló eredményességgel.

5.4.2. A képi objektumok (szegmensek) osztályozása tulajdonságtérbeli szomszédság alapján

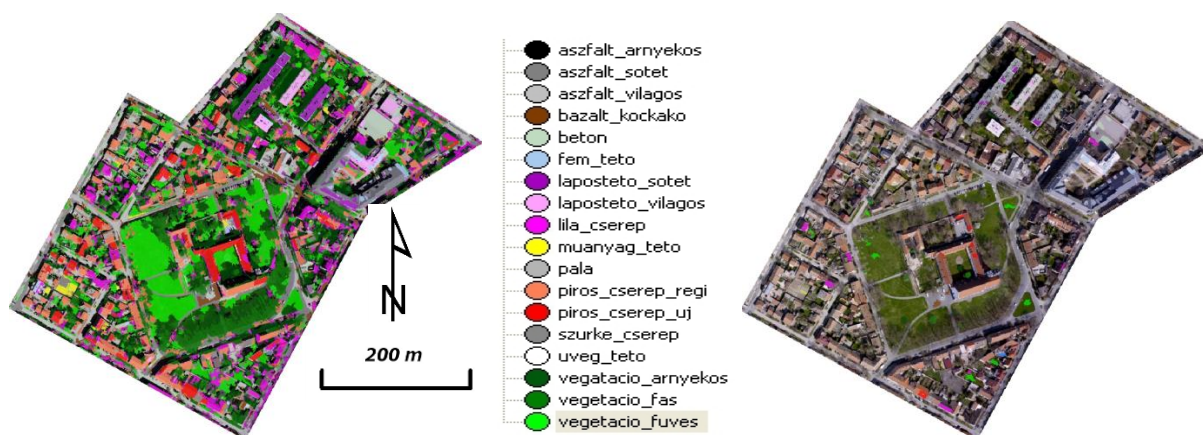
A szegmentált felvétel képi objektumait adattérben mért távolságok alapján is osztályozhatjuk. Az adattér dimenzióját a kiválasztott objektumjellemzők száma határozza meg. Ezek között elsősorban spektrális jellegű értékeket vizsgáltam: az egyes felvételi sávok átlagos pixelértékeit (RGB 1-3 sáv, CIR 1-3 sáv, MNF 1-8 sáv), valamint az 1 méteres rácshálóra átmintázott felszínmodellből származtatott átlagos magasságokat (DSM). Különböző számú jellemzőt figyelembe véve vizsgáltam az osztályozás pontosságának változását (5.4. táblázat). Az RGB felvételek alapján 50-100-200-300 scale faktorral létrehozott objektumokkal egyaránt elvégeztem a fenti klasszifikációkat.

Összesen 17 osztályt definiáltam, melyek között tetőborítások, útburkolatok és vegetáció egyformán megtalálható volt (5.17. ábra). Ezek mindegyikéhez tanító és referencia objektumokat gyűjtöttem a legrészletesebb (scale = 50) objektumrétegről.

5.4. TÁBLÁZAT Az osztályozás megbízhatóságának alakulása különböző méretű (scale) szegmensek és a felhasznált adatrétegek alapján

Overall Accuracy Kappa Coefficient	scale 50	scale 100	scale 200	scale 300	Overall Accuracy Kappa Coefficient	scale 50	scale 100	scale 200	scale 300
RGB (1-3)	0,61	0,65	0,69	0,61	RGB (1-3) + DSM	0,56	0,56	0,56	0,59
	0,58	0,62	0,67	0,58	+ CIR (1-3)	0,53	0,53	0,53	0,56
CIR (1-3)	0,23	0,18	0,14	0,12	RGB (1-3) + DSM	0,79	0,79	0,72	0,73
	0,18	0,13	0,08	0,06	+ MNF (1-8)	0,78	0,77	0,70	0,71
MNF (1-8)	0,67	0,68	0,69	0,66	RGB (1-3) + DSM	0,75			
	0,65	0,66	0,66	0,63	+ CIR (1-3) + MNF (1-3)	0,73			
RGB (1-3) + DSM	0,74	0,72	0,73	0,76					
	0,72	0,70	0,71	0,74					

A fenti táblázatból jól látszik, hogy az RGB felvételek valós színes sávjai és az MNF transzformált hiperspektrális adatok közel hasonló osztályba sorolási pontosságot eredményeztek. Míg a szegmensek mérete előbbi esetben jelentős hatással volt a megbízhatóságra, az MNF adatoknál ez az eltérés nem figyelhető meg. Érdekes tapasztalat, hogy a CIR sávok alapján sikertelennek mondható a klasszifikáció, amit a felvételek pontatlan geometriájával és az eltérő árnyékhatásokkal magyarázhatunk. A magassági információk (DSM) integrálásával – a várakozásoknak megfelelően - a pontosság tovább növekedett. A bemeneti sávok kombinálása során a legjobb eredményt az RGB, MNF és DSM rétegek együttes alkalmazása szolgáltatta. A 79 %-os Overall Accuracy érték azonban jelen esetben is osztályonként változatos Producer's és User's Accuracy eredményeket takar (8/B melléklet).



5.17. ÁBRA Az RGB, MNF és DSM rétegek felhasználásával futtatott szegmens alapú osztályozás eredménytérképe (balra) és az RGB felvétel kivágat a tanítóterületekkel (jobbra)

5.5. A felvételek spektrális információtartamának kinyerése

A következő fejezetben a különböző távérzékelte adatforrásokból hagyományos interpretációs módszerekkel, pixel-alapú osztályozásokkal végrehajtott információkinyerést mutatom be. Ennek során külön fejezetekben taglalom a hiperspektrális (5.5.1.), a színes-infravörös (5.5.2.) és a hőtartományú (5.5.3.) felvételeket. A tradicionális klasszifikációs eljárásokat az általuk szolgáltatott eredmény – felszínborítási – térképek pontossága alapján egymással összevetem és értékelem.

5.5.1. Hiperspektrális adatok klasszifikációja

Három különböző mintaterületen legalább 2 növényzeti, 2 épület (tetőborítás), 2 útburkolati osztály elkülönítése volt a célom. Ennek keretében az elsősorban multispektrális adatokon alkalmazott automatikus (ISODATA) és irányított (Minimum Distance, Maximum Likelihood) eljárásokat és egy már speciálisan hiperspektrális osztályozó algoritmust (Spectral Angle Mapping) teszteltem. A tanulóterületek (Region Of Interest – ROI) megegyeztek az 5.2.2 fejezetben felhasználtakkal. Az osztályozásokat az eredeti – zajos sávoktól manuálisan megszürt – és a PCA/MNF transzformált felvételeken is elvégeztem.

5.5.1.1. ISODATA klaszterezés

Az ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) ismétlődő önszervező adatelemző módszer. A minimális spektrális távolságok módszerét alkalmazza a pixelek osztályba sorolásakor. Az algoritmusnak három paramétere van: (1) a klaszterek maximális száma (N), (2) a konvergencia küszöb (T), amely megadja, hogy maximálisan a pixelek hány százaléka maradhat változatlan az iterációk között és (3) az iterációk maximális száma (M). Az előre megadott számú klaszter átlagértékei folyamatosan módosulnak egy-egy új pixel osztályba sorolásával. A vizsgált pixel és a klaszterközepek térbeli távolságait vizsgálva az algoritmus a képelemet ahhoz a klaszterhez rendeli, mely közepéhez a spektrális térben legközelebb található. Az iteráció után, ha az ugyanabban a klaszterben maradó pixelek aránya eléri a konvergencia küszöböt, az algoritmus befejeződik (MUCSI, 2003).

Alapesetben a spektrális hasonlóság az *Euklideszi-távolság* (d) mérésén alapul:

$$d(x_1, x_2) = \sqrt{\{\sum_{i=1}^N (x_{1i} - x_{2i})^2\}} \quad (9)$$

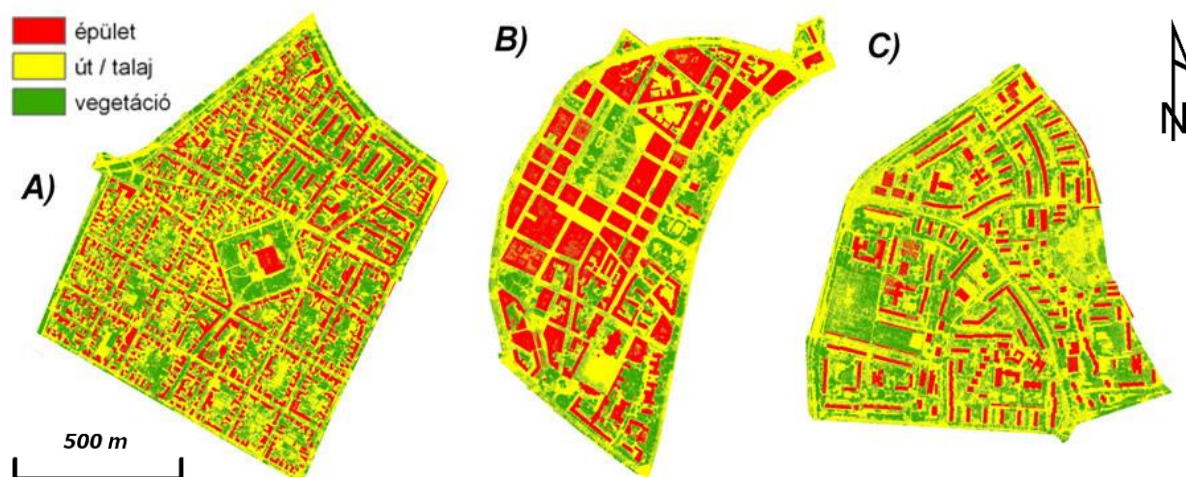
ahol: N a spektrális összetevők száma.

x_1 és x_2 a vizsgált N dimenziós pontok

Az ISODATA klaszterezést mintaterületenkénti bontásban, három különböző – más-más előfeldolgozáson átesett – adathalmazon végeztem el. Ennek megfelelően a feldolgozás során mintaterületenként eltérő osztályok kerültek definiálásra. Minden esetben az ENVI szoftver ISODATA algoritmusát használtam a minimum 10, maximum 15 (N) osztály definiálásához. Az iterációk számának felső határa 10 (M), a változó besorolású pixelek arányának küszöbértéke 5% (T) volt. Elsőként a – zajos sávoktól (bad bands) megszürt – 240 sávós állományon, majd annak PCA, illetve MNF transzformált verzióján (ld. 4.4.5.5. fejezet) futtattam le a műveletet. A PCA és MNF képek első 6, zajmentes sávját használtam csak fel.

Az eredmények megbízhatóságát különböző forrásból származó *referenciaadatok* felhasználásával ellenőriztem, melyek 4 kategóriában álltak rendelkezésemre (5.18. ábra). Az (1) épületek (tetők) vektoros alaptérképről kerültek levezetésre, a (2) növényzetet 50 cm felbontású CIR adatokból számított NDVI értékek (ld. 5.5.2.1. fejezet) küszöbölésével határoltam le. A mintaterület többi része az (3) út, utca, köztér, talaj (ez utóbbi csak nagyon

kis területeken jelenik meg) összevont kategóriát alkotott. A 4. osztály a referenciaadatok előállításának módszerének hozadéka: olyan képelemek alkotják, melyek az épületek belső udvaraiban található vagy a tetők fölé nyúló növényzetet reprezentálják. A tematikus állomány pixeleit a hiperspektrális adatok térbeli felbontására (1,5 méter) aggregáltam.

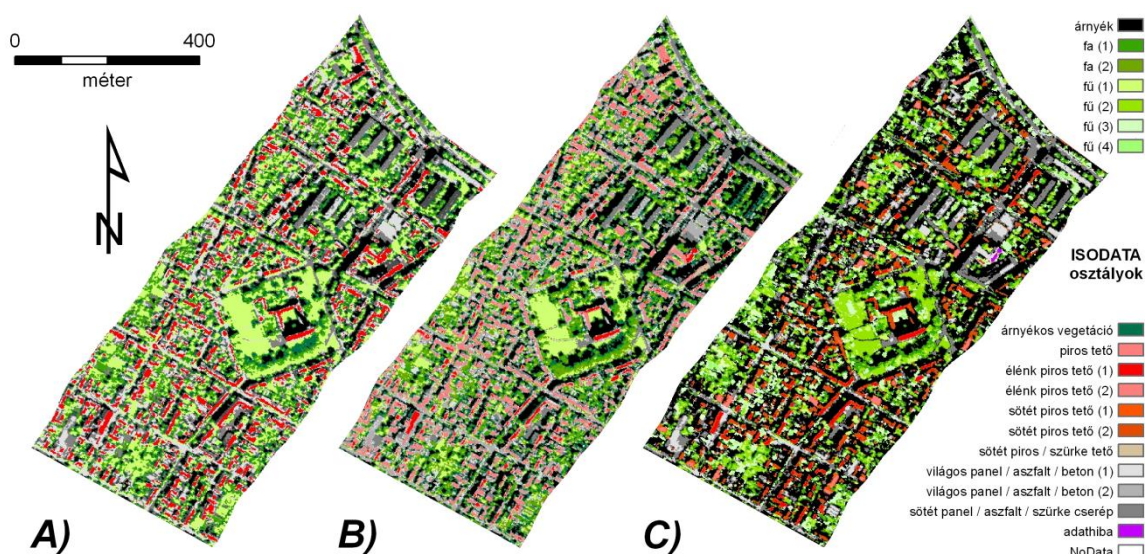


5.18. ÁBRA A vektoros épület poligonokból és a CIR képek NDVI osztályozásából származtatott referencia állományok térképe Alsóvárosban (A), Belvárosban (B) és Tarjánban (C)

A következőkben az eredménytérképeket és - numerikus formában - a létrejött klaszterek és az egyes referencia osztályok keresztábráit mutatom be röviden. Mindhárom mintaterületen 3 klaszterezett állomány jött létre: az eredeti (*ALL240*), illetve a kiválasztott *PCA* és *MNF* sávok felhasználásával.

Alsóváros

Az ISODATA algoritmus ezen a területen 1 (PCA és MNF sávokból) vagy 2 (ALL240-ből) árnyékos osztályt adott eredményül. Ez az eredeti sávokkal számolva a teljes terület kb. 11%-ára terjedt ki, míg az MNF állomány esetén közel 40% került ebbe a klaszterbe (9/A melléklet). Az árnyékos pixelek egyébként főként az út / talaj kategóriában jelentek meg, amit a viszonylag alacsony napmagasság (a felvételezés időpontja reggel 8:55-kor volt) következtében vetülő hosszú épület és lombkorona árnyékok magyaráznak (5.19. ábra).



5.19. ÁBRA A hiperspektrális felvételek ISODATA klaszterezésének eredménye Alsóvárosban az eredeti (A), a PCA (B) és az MNF (C) transzformált sávok alapján

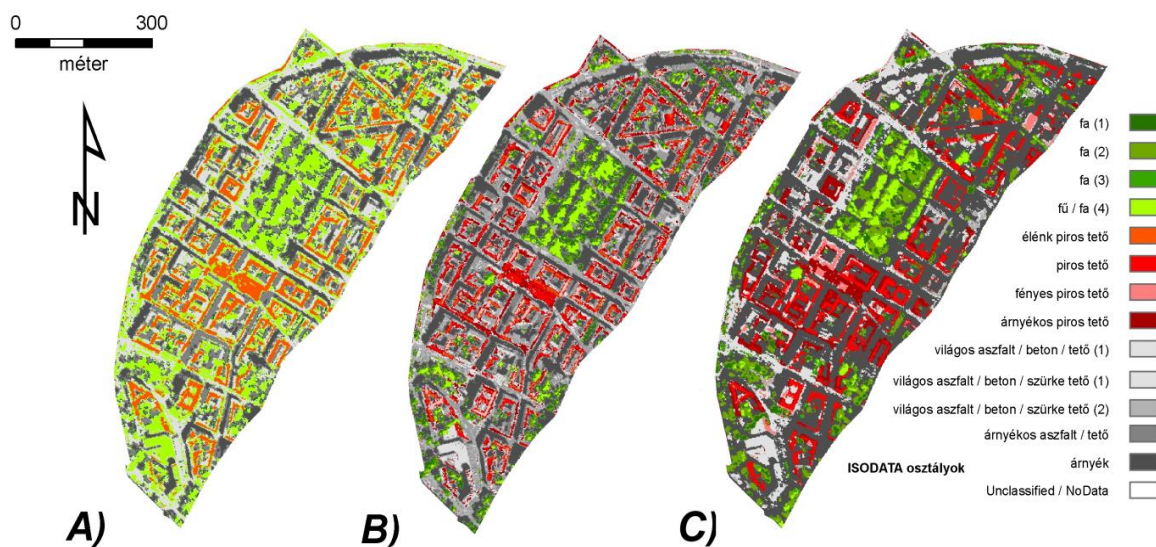
A növényzeti osztályok száma nagy változatosságot mutat. Az MNF állományból 6 darab – általában csak fényességben különböző – vegetáció „típus” került levezetésre. Ezek a *vegetáció* referencia területeknek csak 55-65%-át fedték le, azonban jelentős arányban terjedtek ki az út / talaj kategóriára (~30%) (9/A melléklet).

A három mintaterület közül – a Belvárost követően - itt a legnagyobb a cserép tetőborítások aránya. Ennek megfelelően *piros / sötét piros / élénk piros* osztályokat is elkülönített az algoritmus. Az aszfalt útburkolatokkal erősen keveredő sötét és világos panel tetőkkel együtt ezek adják az épület referencia kategória nagy részét (~70%) (9/A melléklet)

Belváros

A Belvárosban csökken a növényzet szerepe, egyre nagyobb területek vannak beépítve: az útburkolatok mellett a cseréptetők és néhány tömbház is megfigyelhető (5.20. ábra). Az *árnyékos* felszínek itt is nagyarányúak, és szintén az MNF állomány esetén érik el maximumukat (49%) (9/B melléklet). Hasonló megállapításokat tehetünk a lombkoronák kitakaró hatásáról, mint Alsóvárosban. Ehhez járul még a magas épületek kidőléséből fakadó kitakarás, illetve egy-két helyen a pontatlan geometria hatása (pl. az *út / talaj* és *épület* kategóriában megjelenő nagyszámú vegetációs képelem).

Az eredménytérképeket szemlélve megállapítható, hogy a piros cseréptetős épületek szépen elkülönülnek környezetüktől, az utcák nagy része azonban valamely árnyékos osztályba került. A fásszárú és lágyszárú vegetáció szeparálása szintén nem járt sikerrel, ellentétben az alsóvárosi területtel (9/B melléklet).



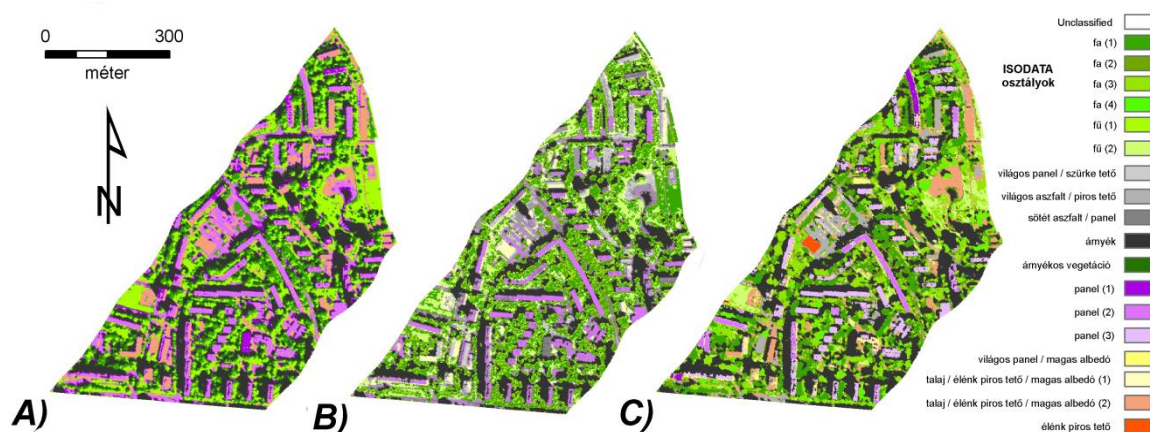
5.20. ÁBRA

A hiperspektrális felvételek ISODATA klaszterezésének eredménye a Belvárosban az eredeti (A), a PCA (B) és az MNF (C) transzformált sávok alapján

Tarján

A hiperspektrális adatok ISODATA klaszterezésének eredményeit az 5.21. ábrán és az 9/C mellékletben foglaltam össze.

Tarjánban újra jelentős vegetációval találkozhatunk az 5-10 emeletes panel blokkok között (5.21. ábra). Az árnyékhatás is elsősorban ezeknek az épületeknek köszönhető (a teljes terület 23-31%-a). A növényzet csak ritkán (3-8%) – az alacsonyabb tetők felett – jelenik meg az épületek kategóriában, viszont annál gyakoribb az útburkolatok felett (40-45%) (9/C melléklet). A panel épületek elkülönítése viszonylag sikeres, mivel ezeket a növényzet nem, a hasonló spektrális tulajdonságú utakat viszont nagyrészt kitakarja a lombkorona.



5.21. ÁBRA A hiperspektrális felvételek ISODATA klasztizálásának eredménye Tarjánban az eredeti (A), a PCA (B) és az MNF (C) transzformált sávok alapján

5.5.1.2. Irányított osztályozások

Az irányított osztályozás során az algoritmus tanítása előre kijelölt pixelekkel (*signatures*) történik. Ezek a pixelhalmazok szolgáltatják a többi képelem osztályba sorolásához szükséges kiindulási információkat. A statisztikai paramétereken (pl. középérték, szórás, kovariancia mátrix, stb.) alapuló pixelhalmazt *parametrikus*, a spektrális térben megadott diszkrét alakzatot *non-parametrikus* tanulónak nevezik. A tanuló képelemek értékelése a *kontingencia mátrix* kiszámításával, illetve *szeparabilitás vizsgálattal* történhet. Előbbi megmutatja, hogy a tanulók pixelei százalékosan vagy számszerűen hogyan osztályozódtak. Szeparabilitáson a tanulók statisztikai – itt spektrális térbeli – távolságát értjük (ld. 5.2.1.2. fejezet). A további képelemek osztályba sorolása parametrikus és non-parametrikus döntési szabályok alapján végezhető el (MUCSI, 2003). Jelen vizsgálatban a parametrikus *Minimum Distance* és *Maximum Likelihood* algoritmusokat alkalmaztam.

Mivel a tanításhoz felhasznált képelemeket a teljes hiperspektrális felvételtől gyűjtöttem, az algoritmusokat is a teljes hiperspektrális pásztán futtattam le. A zajos sávoktól megszűrt 240 sávós állomány mellett a PCA és MNF képek első 6, zajmentes sávját¹³ használtam csak fel. A mintaterületek pixeleit 80:20 arányban kettéosztottam, előbbi halmazt a betanításhoz, utóbbit az eredmények értékeléséhez használtam fel (7.sz. melléklet).

MINIMUM DISTANCE (MD)

A módszer az osztályozni kívánt pixel és az n darab előre definiált tanuló átlagértékei közötti spektrális távolság mérésén alapul. A pixelt ahhoz az osztályhoz rendeli, melyet reprezentáló tanuló átlagértékéhez a legközelebb van, vagyis amelyre az alábbi kifejezés minimális (MUCSI, 2003):

$$SD_{xyc} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_{ci} - X_{xyi})^2} \quad (10)$$

ahol:

n = a sávok száma (dimenzió)

i = az adott sáv indexe

c = az adott osztály index

X_{xyi} = az i sáv x,y pixelének az értéke

SD_{xyc} = az x,y pixel és a c osztály közötti távolság

¹³ PCA 1-6, MNF 2-7 sávok

Nagy varianciájú tanulókat (pl. összevont cseréptetők) csak akkor alkalmazhatunk, ha azok nem bontható homogén résztanulókra, illetve a legközelebbi tanuló átlagvektora és a nagy varianciájú tanuló átlagvektorának a távolsága legalább kétszerese ez utóbbi tanulón belül mérhető legnagyobb spektrális távolságnak.

Az 5.2.2. fejezetben már bemutatott felszínborítási típusok képezték a vizsgált osztályokat (5.22. ábra). Az eredmények ismertetése során a teljes felvételen, három eltérő bemeneti adatból (ALL240, PCA, MNF) levezetett térképeket és azok pontosságának értékelését részletezem.

	Unclassified		Aszfalt (sötét)
	Piros cserép (új)		Aszfalt (világos)
	Piros cserép (rég)		Aszfalt (árnyékos)
	Lila cserép		Beton
	Pala		Díszburkolat (piros-sötét)
	Szürke cserép		Díszburkolat (piros-világos)
	Lapostető (sötét)		Bazalt kockakő
	Lapostető (világos)		Vasút
	Műanyag tető		Fás vegetáció
	Üveg tető		Füves vegetáció
	Fém tető		Árnyékos vegetáció

5.22. ÁBRA A hiperspektrális adatok irányított osztályozása során használt felszínborítási kategóriák és azok jelkulcsa (az 5.5.1.2. fejezet további térképein ezek láthatók)

Az eredeti és a PCA sávok alapján elvégzett irányított osztályozások eredményei nagy hasonlóságot mutattak, amit a térképek és a referencia képelemekkel történő visszaellenőrzés eredményei is alátámasztanak. Az MNF transzformált állományból levezetett osztályok azonban sokszor ettől egészen eltérő eloszlásúak (10/A melléklet)

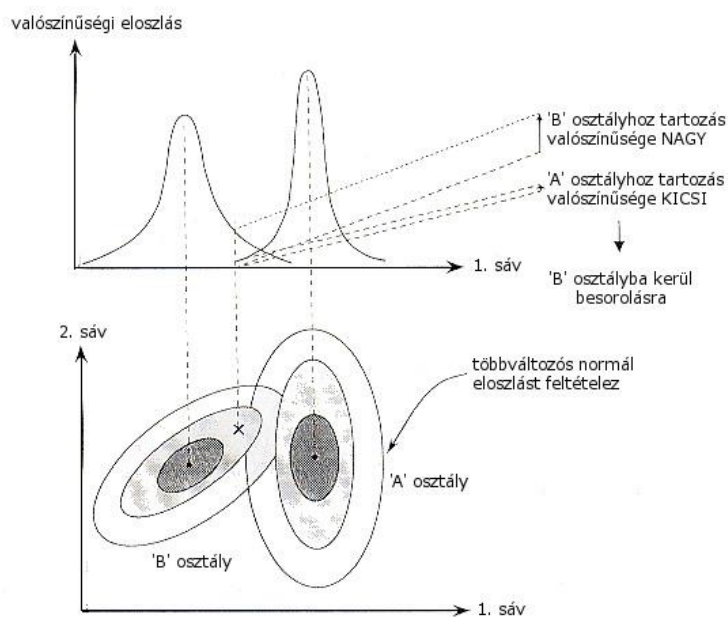
A *Minimum Distance* algoritmus által szolgáltatott osztályozások teljes pontossága – a bemenő ALL240, PCA és MNF adattípusok szerint – rendre **45.12%**, **44.37%**, illetve **66.57%** lett. Ez a szám azonban most sem tükrözi vissza az egyes osztályokra számított megbízhatóságot. A Producer's pontosságot vizsgálva megállapítható, hogy a *műanyag tető*, *árnyékos aszfalt*, *díszburkolat*, *vasút* és *árnyékos vegetáció* osztályok mindhárom bementi adatforrás esetén nagy valószínűséggel (>80%) kerültek helyes osztályba. Ezzel szemben például a *pala* és *fém tető*ket, illetve a *füves* és *fás vegetációt* csak az MNF adatok alapján sikerült nagy pontossággal (>90%) besorolni (12.sz. melléklet). A User's Accuracy értékek alapján az előzőek mellett a *lila cserép* és a *világos lapos tetők*, illetve a *sötét aszfalt* osztályba is döntő részt (>80%) helyes képelemek kerültek. Az alapadat itt már nem okoz jelentős különbségeket (12.sz. melléklet).

Az eredmény térképeket vizsgálva megállapíthatjuk, hogy vegetációval borított területek osztályba sorolása csak kismértékben különbözik (ld. Mátyás-tér, Széchenyi-tér fás/füves vegetáció felcserélődése) (10/A melléklet). Ennél jelentősebb eltérések figyelhetők meg a cseréptetőknél: az MNF kép alapján – Producer's Accuracy értékkel is alátámasztva – jóval nagyobb valószínűséggel sikerült helyes osztályba sorolni a *piros* és *lila cserépeket*, mint az eredeti vagy PCA adatokból kiindulva (~12 → 53%, ~20 → 46%, ~20 → 56%). Az útburkolati osztályok pontossága nagy szórást mutat. Az árnyékos (sötét) kategóriákat valamivel nagyobb megbízhatóság jellemzi (pl. *árnyékos/sötét aszfalt*, *díszburkolat*) (10/B melléklet).

Összességében elmondható, hogy a Minimum Distance algoritmus nem szolgáltat megfelelő pontosságú eredményeket. A módszer alkalmazása csak az MNF adatokon ajánlott, de ebben az esetben is vannak olyan – általában spektrálisan nehezen definiálható – kategóriák, melyek osztályozási hibái nem tolerálhatók.

MAXIMUM LIKELIHOOD (ML)

A parametrikus módszerrel azt vizsgálhatjuk, hogy egy pixel milyen valószínűséggel tartozik egy adott osztályba. Az eljárás fontos előfeltételezése, hogy a valószínűségek egyenlők minden osztályra vonatkozóan és a bemenő sávok normális eloszlásúak (5.23. ábra) (MUCSI, 2003).



5.23. ÁBRA A Maximum Likelihood osztályozó algoritmus működési elve
(Forrás: JARS, 1996¹⁴)

A módszer nem volt alkalmazható az eredeti – spektrális transzformáció nélküli – 240 sávós felvételen, ugyanis egyes tanulók – a bemenő csatornák mennyiségét meg nem haladó - alacsony pixelszáma ezt statisztikailag nem tette lehetővé. A transzformált PCA és MNF képekből csak az első 6 zajmentes sávval dolgoztam, így ezeknél a fenti probléma nem jelentkezett.

A Minimum Distance módszerrel összehasonlítva jelentősen növekedtek az Overall Accuracy értékek (~45%, illetve 66% → 86%), melyek azonban továbbra is nagy heterogenitásokat takarnak az egyes felszínborítási osztályok szintjén. Minden kategória esetében növekedett a Producer's és User's pontosság mértéke (12.sz. melléklet). Azonban a *szürke cserép*, *bazalt* és *beton* osztályoknál a referencia képelemek sorrendben kevesebb, mint 67, 55 és 40%-ban kerülnek csak a helyes osztályba. Mivel ezek más módszerek alkalmazásakor is problémát jelentettek, indokolt lehet kizárásuk vagy összevonásuk más kategóriákkal. A *piros cserepek* továbbra is pontosabban osztályozódnak az MNF sávok felhasználásakor (5.24. ábra), míg a *pala*, a *világos lapos tetők*, a *sötét aszfalt* és *beton* felszíneknél éppen fordított a helyzet a PCA képek javára (11.sz. melléklet).

¹⁴ <http://wtlab.iis.u-tokyo.ac.jp/~wataru/lecture/rsgis/rsnote/cp11/11-7-1.gif>



5.24. ÁBRA A hiperspektrális adatok Maximum Likelihood osztályozásának eredménye a három mintaterületen az MNF transzformált sávok alapján (jelkulcs: 5.22. ábra)

SPECTRAL ANGLE MAPPER (SAM)

A Spectral Angle Mapper (SAM) irányított osztályozási algoritmust elsősorban a nagy spektrális dimenzióval jellemezhető, sok csatornás állományokon alkalmazzák. A besorolás alapja a tanulók és a vizsgált képelem spektrális térben megadott n -dimenziós vektorának szögeltérése. Az elem mindig abba az osztályba kerül, melynek átlagvektorától a legkisebb szöggel tér el. Az algoritmus futása küszöbértékkel korlátozható, melynél nagyobb eltérések esetén nem történik osztályba sorolás. Ennek megfelelően a teljes adathalmaz osztályozása helyett alkalmasabb csak bizonyos tulajdonságú képelemek keresésére, illetve ún. *rule image*-ek létrehozására. Ez utóbbiak osztályonként tartalmazzák minden egyes pixelre a számított szögeltéréseket, melyek utólag – például döntési fákban – felhasználhatók. Jól definiált, homogén tanító pixelhalmaz definiálása esetén – alacsony szögeltérési küszöbértékkel – gyakran előfordulhat, hogy a képelemek nagy része osztályozatlan marad (KRUSE ET AL., 1993).

A SAM osztályozó algoritmust a teljes pásztára futtattam le, annak eredeti és PCA, illetve MNF transzformált sávjait felhasználva. Az ENVI képfeldolgozó szoftverben használt alapértelmezett küszöbértékkel (0.1 rad) az MNF kép esetében a pixelek 96,5%-a nem került besorolásra. Az eredeti sávokkal ez 37,3%-nak, a PCA adathalmazzal pedig 29,4%-nak adódott. Ennek következtében megnőveltem a küszöbértéket, és 0.5, illetve 1 rad beállítással is lefuttattam az osztályozást (5.25. ábra). Első lépésben – az MNF kép kivételével – az osztályozatlan képelemek szinte teljesen eltűntek (ALL240: 2,8% és PCA: 0,4%). A módosítás természetesen a teljes pontosságban is megmutatkozott. Az MNF állomány esetében mindenképpen szükséges volt a küszöbérték további (1 rad-ig) növelése. Így ez utóbbi osztályozási eredmény szolgáltatva a legnagyobb pontosságot (63,61%), ami azonban még mindig elmarad a Maximum Likelihood eljárás értékeitől (12.sz. melléklet).



5.25. ÁBRA A hiperspektrális adatok SAM osztályozásának eredménye az alsóvárosi kivágaton szemlélítve az eredeti sávok alapján 0.1 (A), 0.5 (B) és 1 (C) rad küszöbértéket figyelembe véve (jelkulcs ld. 5.22. ábra)

A hiperspektrális adatokon a három irányított osztályozó algoritmust 14 különböző beállítással futtattam le. Az algoritmusokat tekintve a Maximum Likelihood, a bemeneti adatok közül pedig az MNF transzformált képek szolgáltatták a legjobb eredményeket. Az előre definiált felszínborítási kategóriák között találunk néhányat (pl. *pala*, *szürke cserép*, *bazalt kockakő*), melyek ezen módszerekkel megbízhatóan nem osztályozhatók. Ennek okait kereshetjük a más osztályokhoz nagyban hasonló spektrális tulajdonságokban, vagy egyszerűen mintavételi pontatlanságokban. A vizsgálatok eredményei, minden egyes osztály Producer's és User's Accuracy értékével a 12/A és 12/B mellékletekben megtekinthetők.

5.5.2. CIR adatok klasszifikációja

A színes-infravörös légifelvételek a látható zöld és vörös, illetve a közeli-infravörös (Near-InfraRed, NIR) tartományban rögzítik a felszíni reflektanciát (3/A melléklet). A valós színes képekkel összevetve ez a konfiguráció alkalmasabb a vegetáció és a vízfelszínének azonosítására. Ez a lefuttatott osztályozások eredményeiben is tükröződik: a növényzeti osztályokat viszonylag nagy pontossággal sikerült lehatárolni, míg az – egymáshoz anyagukban sokszor nagyon hasonló – épület (tető) és útburkolati kategóriák egymással erősen keveredtek.

5.5.2.1. Az NDVI index alkalmazhatóság

A városi mintaterületeken a növényzet térképezése nagy jelentőséggel bír. Ennek egyik legegyszerűbb módja a különböző vegetációs indexek számítása. A NIR tartományban ugrásszerűen emelkedő reflektancia hatására jellegzetes, ún. vörös él jelenik meg a vegetációval borított pixelek spektrumgörbéin. A vörös és közeli infravörös reflektancia közti nagy eltérést használjuk ki a normalizált differenciális vegetációs index (NDVI) számításakor.

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)} \quad (11)$$

ahol:

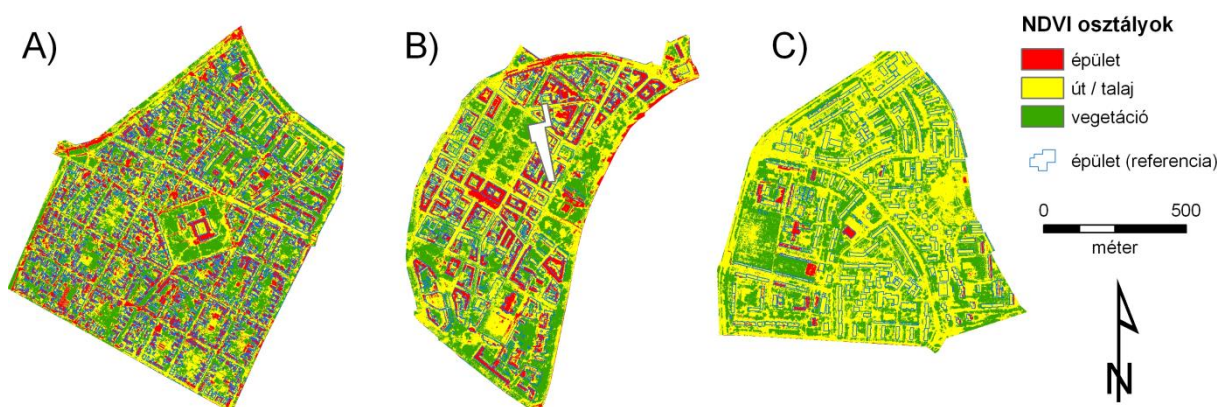
NIR a közeli infravörös tartományban mért reflektancia
VIS a látható vörös tartományban mért reflektancia

A levezetett térképeken vegetációt csak 0-nál nagyobb értékek jelölhetnek (ui. $NIR > VIS$). Az adott felvételektől – és azok előzetes radiometriai korrekciójától - függően a vegetáció NDVI küszöbértéke változó lehet. A küszöbértékeket a hisztogramok alapján határoztam meg. A pixelértékek eloszlásában természetes töréseket (Natural Breaks) keresve 4 osztályt különítettem el, melyek közül a legmagasabb NDVI értékekkel rendelkező reprezentálta a *vegetációt*, az azt követő az *út és talaj* felszíneket, míg az utolsó kettő összevonva az *épület* (tető) pixeleket. A három mintaterületen a törések kis különbséggel, az 5.5. táblázatban megadottak szerint alakultak.

5.5. TÁBLÁZAT Az NDVI értékek hisztogramjának természetes törései mintaterületenként

NDVI	ALSÓVÁROS	BELVÁROS	TARJÁN
<i>Épület</i>	$< 0,13$	$< 0,09$	$< 0,11$
<i>Út / talaj</i>	$0,13 - 0,34$	$0,09 - 0,27$	$0,11 - 0,30$
<i>Vegetáció</i>	$> 0,34$	$> 0,27$	$> 0,30$

Ezzel a módszerrel az egyéb, nem növényzeti felszínborítási kategóriák elkülönítése sajnos nem járt teljes sikerrel. Az épületek és útburkolatok sokszor egybeolvadtnak, a tarjáni városrészben például csak a magasabb albedóval rendelkező tetők emelhetők ki (5.26. ábra). A Belvárosban és Alsóvárosban ennél nagyobb pontosságot sikerült elérni (5.6. táblázat).



5.26. ÁBRA NDVI értékek alapján képzett felszínborítási osztályok Alsóvárosban (A), Belvárosban (B) és Tarjánban (C)

Az eredménytérképek pontosságának becsléséhez vektoros formátumban rendelkezésre álló épület poligonokat használtam fel. A többi – vegetáció és út /talaj – osztályokhoz nem állt rendelkezésre vektoros referencia állomány. Az 5.6. táblázat keresztátláiban látható, hogy egyedül Alsóvárosban kerültek többségében az épület osztályba a referencia képelemek. A növényzet elkülönülése mindhárom területen megfigyelhető, amit az eredeti felvételekkel történő vizuális összevetés is megerősített (5.26. ábra). Az épület és út/tető pixelek elválasztása a küszöbérték finomításával tovább pontosítható.

5.6. TÁBLÁZAT CIR felvételekből NDVI index értékek felhasználásával definiált kategóriák megoszlási aránya az épület referencia zónában

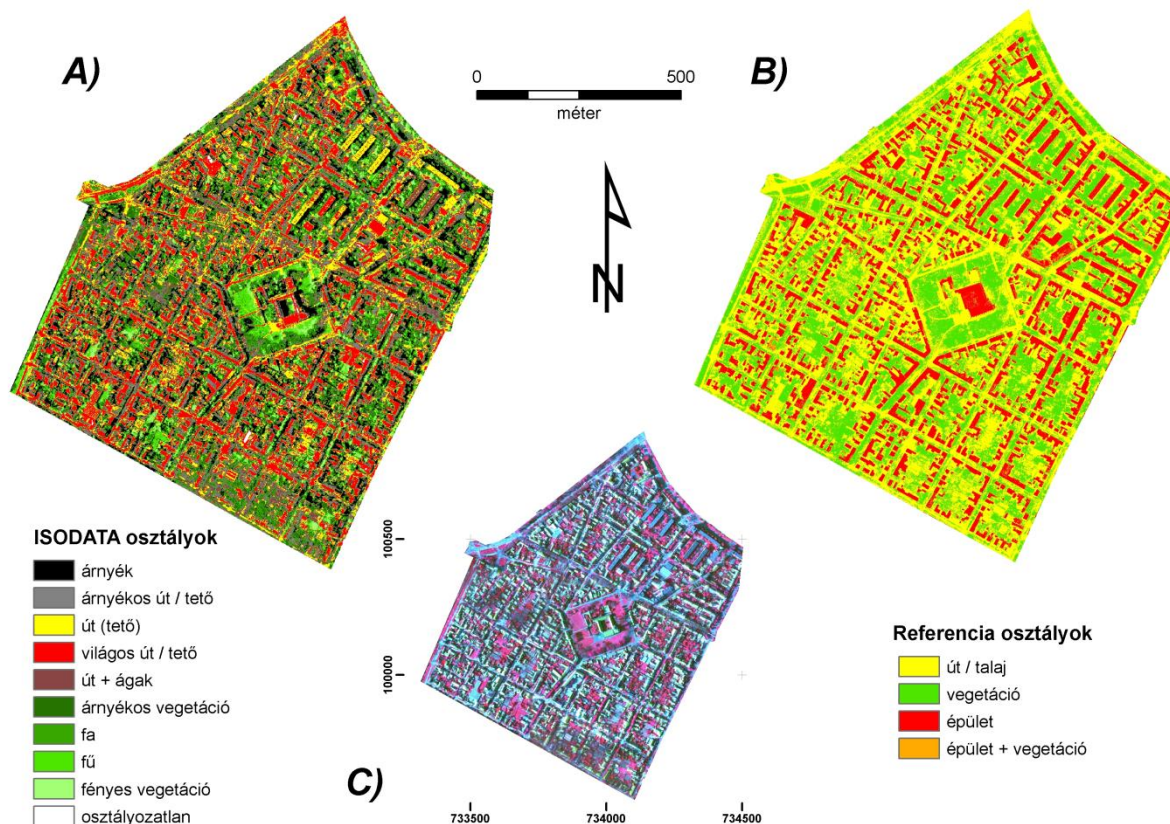
ALSÓVÁROS				BELVÁROS				TARJÁN			
Referencia	épület			Referencia	épület			Referencia	épület		
Osztály (NDVI)	# pixel	%	hektár	Osztály (NDVI)	# pixel	%	hektár	Osztály (NDVI)	# pixel	%	hektár
épület (>0.11)	418606	46,85	9,961	épület (<0.1)	380435	41,44	9,511	épület (<0.13)	49613	9,83	1,24
út / talaj ($0.11 - 0.3$)	361878	40,5	8,611	út / talaj ($0.1 - 0.28$)	408649	44,52	10,216	út / talaj ($0.13 - 0.35$)	380306	75,38	9,508
vegetáció (>0.3)	112965	12,64	2,688	vegetáció (>0.28)	128802	14,03	3,22	vegetáció (>0.35)	74603	14,79	1,865
Total	893449	100	21,259	Total	917974	100	22,949	Total	504522	100	12,613

5.5.2.2. ISODATA klaszterezés

A színes-infravörös felvételek 3 dimenziós adatteret definiálnak. A klaszterezés során ebben próbáltam egymástól minél egyértelműben elkülönülő pixelhalmazokat lehatárolni. Az ISODATA klaszterezés (ld. 5.5.1.1. fejezet) során minden mintaterületen 10 kiindulási osztályt képeztem. Az algoritmust maximum 10 iterációval, a 0,95-os konvergencia küszöb eléréséig futtattam. Az így létrejött tematikus állományt mintaterületenként értékeltem, melyhez a korábban már bemutatott, 4 kategóriában rendelkezésre álló referencia adatokat használtam fel.

Alsóváros

A felvételezés paramétereiből – napállás, felhőzet – következően mindhárom területen találkozhatunk nagy kiterjedésű árnyékos vagy éppen túlexponált területekkel (5.27. ábra). Ebből következően az *árnyékos* és *világos út/tető*, illetve vegetáció képelemeket különálló osztályokba soroltam. Ahogy az NDVI kategóriáknál is láthattuk, az épület és út pixelek nem különíthetők el egyértelműen. A fasorokkal határolt, családi házaz, viszonylag keskeny utcákon gyakori az útburkolat szinte teljes növényzeti borítottsága (*út+ágak* osztály aránya 12%). A magasabb épületek és fák nagy – füves vagy aszfaltozott – felszínekre vetnek árnyékot (*árnyék*, *árnyékos út / tető*, *árnyékos vegetáció* osztályok), ami a teljes terület közel 1/3-át (32,5%) teszi ki. A különféle növényzeti kategóriák 66%-ban – az árnyékokat is ideszámolva 86%-ban – lefedik a nekik megfelelő, összevont referencia területeket. Az épületek több mint 1/3-ad részben a *világos út / tető*, kb. 16%-ban pedig az *árnyékos út / tető* kategóriába esnek (13/B melléklet). Előbbi pixelek döntő részt az ÉNy-DK irányú tetők napsütötte délies, utóbbiak az árnyékos északias oldalán helyezkednek el. Referenciaadatok hiányában a lágyszárú (*fű*) és fásszárú (*fa*) vegetáció helyes elkülönítését csak az eredeti felvételekkel vizuális értékelésével lehet alátámasztani (13/A melléklet).

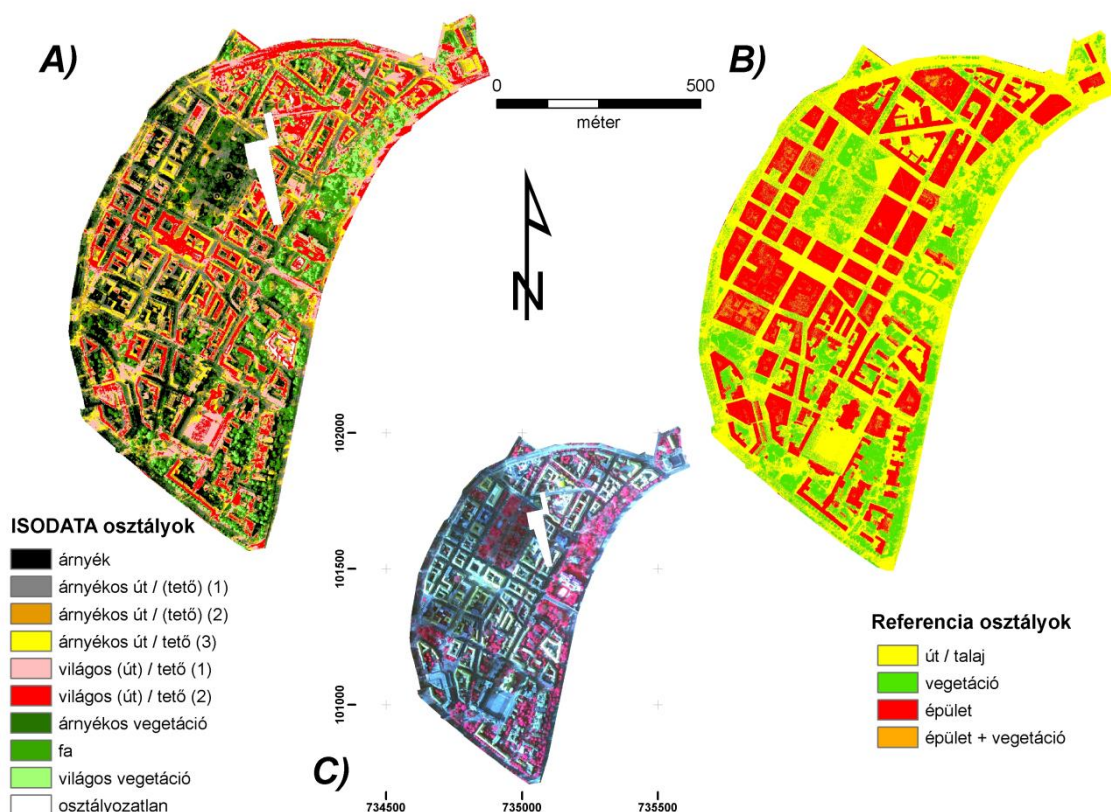


5.27. ÁBRA

Az ISODATA klaszterezés eredménye (A), a felhasznált referencia térkép (B) és az eredeti CIR (C) felvétel Alsóvárosban

Belváros

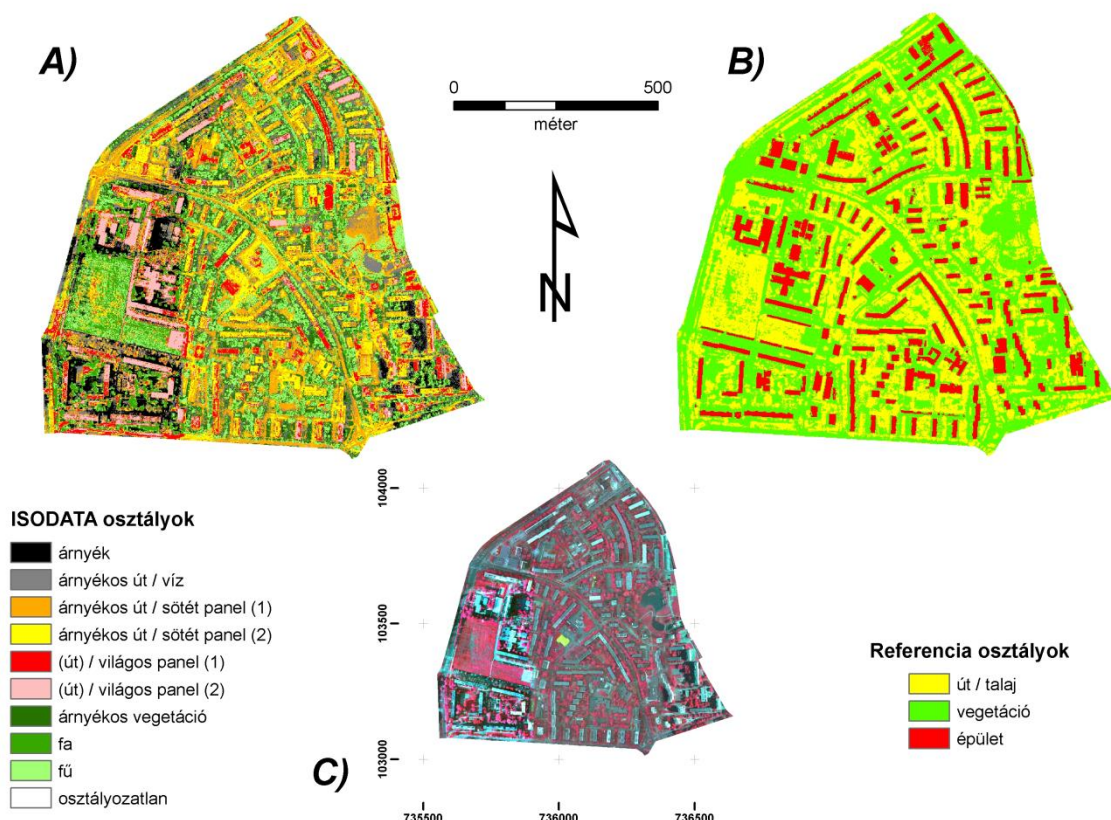
A belvárosban is a fény-árnyék jelenségek voltak legnagyobb hatással a klaszterezés eredményére. A vegetációt leszámítva több – egymástól szinte csak albedóban különböző – épület és út osztályt sikerült elkülöníteni (5.28. ábra). Az épületek 30%-a a *világos (út) / tető* (2) osztályban, közel fele az előző vagy a *világos (út) / tető* (1) kategóriában található. Különösen a Széchenyi-téren okozott problémát a felhőárnyék, ott a növényzeti pixelek jelentős része került az árnyék osztályba. A többszintes épületek a szűk utcákban sokszor a teljes felszínt leárnyékolták (*árnyék* vagy *árnyékos út / tető* (1-3) közel 50%-ban). Ehhez társult még a – főként árnyékos fasorok alkotta – növényzeti borítás (15-20%). Itt is megfigyelhető volt az azonos épületen lévő, de különböző kitettségi tetőfelszínek más-más osztályba sorolása (*árnyékos út / tető* (3), *világos (út) / tető* (1-2)) (13/C melléklet).



5.28. ÁBRA Az ISODATA klaszterezés eredménye (A), a felhasznált referencia térkép (B) és az eredeti CIR (C) felvétel a Belvárosban

Tarján

Az NDVI index számításakor a három elérhető sávból csak kettő információtartalmát használtam fel. Az ISODATA klaszterezés már három adattengellyel dolgozik, így várhatóan nagyobb pontossággal sikerül elkülöníteni egymástól az épület (panel) és út pixeleket. A magas, 5 és 10 szintes panel blokkok teljes utcákat vagy akár alacsonyabb épületeket is leárnyékolnak. A felvételezés egyenetlen megvilágítási viszonyai miatt a terület DNy-i felében túlsúlyba kerültek a világos kategóriák (5.29. ábra). Az épületek közel 70%-án három osztály osztozik (*árnyékos út / sötét panel* (2), *(út) / világos panel* (1-2)), melyek mindegyike nagyobb arányban jelez paneleket, mint útfelületet (13/D melléklet).



5.29. ÁBRA Az ISODATA klaszterezés eredménye (A), a felhasznált referencia térkép (B) és az eredeti CIR (C) felvétel Tarjánban

5.5.2.3. Irányított osztályozások

Az előző részben tárgyalt ISODATA klaszterezéssel ellentétben az ún. irányított osztályozó algoritmusok betanítást igényelnek. Ennek során – egy előre meghatározott osztálystruktúra alapján – tanulóterületeket jelöltem ki. A vizsgált osztályok mintaterületenként kis mértékben eltérnek, alkalmazkodva az adott terület jellegzetességeihez (pl. változatosabb tetőborítások).

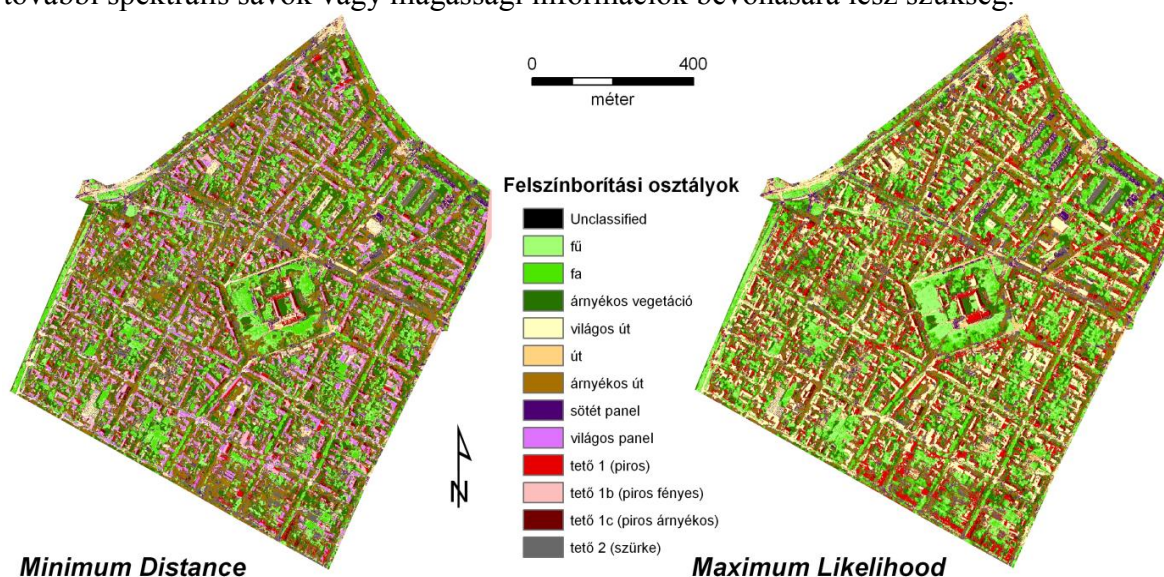
MINIMUM DISTANCE (MD)

A következőkben a spektrális térbeli távolságok mérésén alapuló, parametrikus Minimum Distance algoritmus (ld. 5.5.1.2. fejezet) eredményeit mutatom be. Osztályonként 3-4 önálló terület jelöltem ki, melyek pixeleit 80:20 arányban osztottam fel a betanítás és az ellenőrzés (referencia) céljára. Az osztályozás értékelésének eredményeképpen teljes pontosságot (*Overall Accuracy*), kategóriánkénti *User's* és *Producer's Accuracy*, illetve *Kappa* értéket számoltam. Az ellenőrzést külső, 4 zónára osztott referencia adatokkal (ld. 5.5.1.1. fejezet) is végrehajtottam. Ily módon a térképek összevethetővé váltak az ISODATA klaszterezés eredményeivel.

Alsóváros

Az alsóvárosi mintaterületen 12 osztályt definiáltam (5.30. ábra). A 47 mintaterület összesen 6621 tanuló és 1650 referencia pixelt szolgáltatott. Az osztályozás összegzett pontossága 72,55%-nak adódott ($Kappa = 0,6974$), ami azonban jelentős heterogenitást takar. Az árnyékos kategóriáknak (*árnyékos vegetáció*, *árnyékos út*) és a piros cseréptetőknek a *User's* és a *Producer's* pontossága is kiemelkedő. A növényzeti (*fű* és *fa*) pixelek egymással

nagy hasonlóságot mutatnak, de más felszínektől jól elkülönülnek. A világos panel tetők – az anyagukban hasonló – világos útburkolatokkal keverednek (5.7. táblázat). Elkülönítésükre további spektrális sávok vagy magassági információk bevonására lesz szükség.



5.30. ÁBRA A CIR adatok irányított osztályozásainak eredménye Alsóvárosban

Az eredményeket külső referencia adatokkal összevetve elmondható, hogy az út / talaj zóna pixeleinek csak 40%-a esik valamelyik út kategóriába. A vegetációval borított területek közel 70%-a került helyesen növényzeti osztályba. Az említett két zónában jelentős a képelemek téves besorolása az *árnyékos vegetáció* (11,26%), illetve az *árnyékos út* (21,65%) osztályokba, amit részben magyarázhat a lombkoronával fedett utcák jelenléte. Az épületek zóna esetében a különböző *út* osztályok nagyobb arányú megjelenését a felvételek geometriai hibái (elcsúszások) is indokolhatják (14/A melléklet).

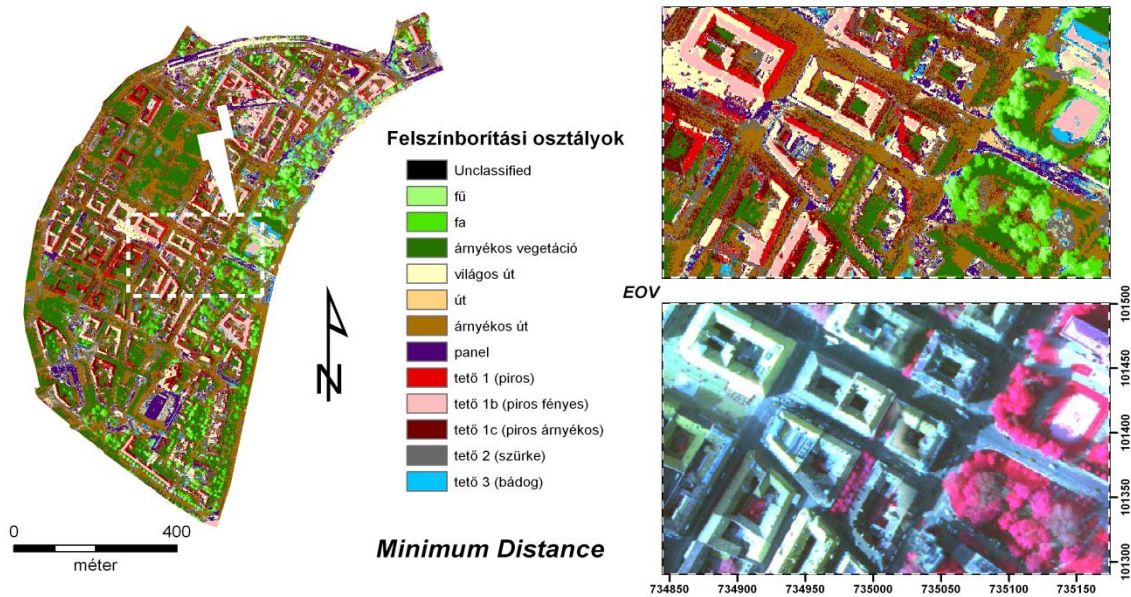
5.7. TÁBLÁZAT A CIR adatok Minimum Distance osztályozásának értékelése Alsóvárosban

Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	világos út	út	árnyékos út	sötét panel	világos panel	tető 1 (piros)	tető 1b (piros fényes)	tető 1c (piros árnyékos)	tető 2 (szürke)	Row Total	Users Accuracy	ALSÓVÁROS (CIR) - MinDist
Classified Data																Classified Data
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Unclassified
fű	0	137	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	189	72.49%	fű
fa	0	81	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	191	57.59%	fa
árnyékos vegetáció	0	0	21	176	0	0	5	0	0	0	0	1	0	203	86.70%	árnyékos vegetáció
világos út	0	0	0	0	83	7	0	2	23	25	0	0	0	140	59.29%	világos út
út	0	0	0	0	0	109	0	48	0	0	0	0	25	182	59.89%	út
árnyékos út	0	0	0	0	0	0	116	0	0	2	0	0	21	139	83.45%	árnyékos út
sötét panel	0	0	0	0	0	62	0	102	0	0	0	0	1	165	61.82%	sötét panel
világos panel	0	0	0	0	36	0	0	0	15	1	6	0	0	58	25.86%	világos panel
tető 1 (piros)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	94	100.00%	tető 1 (piros)
tető 1b (piros fényes)	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	116	0	0	122	95.08%	tető 1b (piros fényes)
tető 1c (piros árnyékos)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	111	0	118	94.07%	tető 1c (piros árnyékos)
tető 2 (szürke)	0	0	0	0	0	0	13	7	0	0	0	1	28	49	57.14%	tető 2 (szürke)
Column Total	0	218	183	176	119	178	134	159	44	129	122	113	75	1650		Column Total
Producers Accuracy	---	62.84%	60.11%	100.00%	69.75%	61.24%	86.57%	64.15%	34.09%	72.87%	95.08%	98.23%	37.33%			
Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	világos út	út	árnyékos út	sötét panel	világos panel	tető 1 (piros)	tető 1b (piros fényes)	tető 1c (piros árnyékos)	tető 2 (szürke)		Overall Class. Accuracy : 72.55%	Overall Kappa Statistics = 0.6974

Belváros

A belvárosi mintaterületen 12 osztályt definiáltam (5.31. ábra), melyhez összesen 46 különálló foltból gyűjtöttem tanító és referencia pixeleket (9681 és 2414 db képelem). A változatosabb tetőtípusok miatt a piros és lila cserép mellett a fém (bádog) tetőket is önálló kategóriának vettem. Az osztályozás teljes pontossága 71,50%-nak adódott (Kappa = 0,6869). Alsóvároshoz hasonlóan itt is jelentős eltérések vannak az egyes osztályok User's és Producer's Accuracy értékei között. A vegetációt reprezentáló kategóriát már nemcsak az egyéb felszínektől különültek el jól, de egymással is kevésbé keveredtek. Az *út*, *panel* és *tető 2 (szürke)* osztályok spektrálisan nagyon hasonlóak, osztályozásuk nem bizonyult megbízhatónak. A különböző megvilágítású, de egyformán piros cserepek ehhez képest jól

definiált kategóriákat alkottak. Érdekes módon, miközben a referenciaként felvett fém tetőknek csak 63,41%-a került helyes osztályba, az eredménytérkép megbízhatósága ugyanerre a felszínre 94,20% lett (5.8. táblázat).



5.31. ÁBRA A CIR adatok Minimum Distance osztályozásainak eredménye a Belvárosban

A külső referencia zónákkal összevetve szembetűnő, hogy az *út / talaj* zónának csak 5,7%-a került az *út* osztályba. Az utcák közel 40%-ára a környező épületek vagy a lombkoronák árnyékot vetettek. A *sötét panel* és *tető 3 (szürke)* osztályokba az anyag- és színbeli hasonlóság miatt, a *tető 1c (piros árnyékos)* kategóriába inkább a geometriai hibák következtében estek a képelemek. A növényzeti zóna kb. 70%-a került valamely vegetációs osztályba. Az épületek közel 60%-a tetőként jelent meg az eredmény térképen is (14/B melléklet).

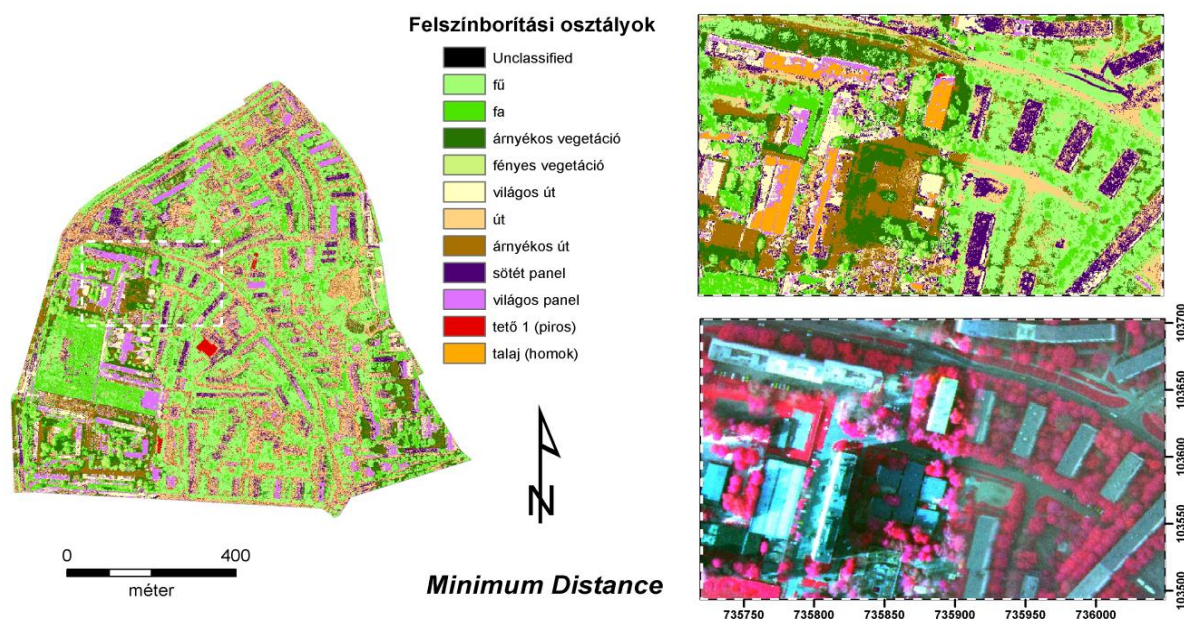
5.8. TÁBLÁZAT A CIR adatok Minimum Distance osztályozásának értékelése a Belvárosban

Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	világos út	út	árnyékos út	panel	tető 1 (piros)	tető 1b (piros fényes)	tető 1c (piros árnyékos)	tető 2 (szürke)	tető 3 (bádóg)	Row Total	Users Accuracy	BELVÁROS (CIR) - MinDist
Classified Data	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Classified Data
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Unclassified
fű	0	104	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	174	59.77%	fű
fa	0	20	181	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	201	90.05%	fa
árnyékos vegetáció	0	0	4	207	0	0	8	0	0	0	12	0	0	231	89.61%	árnyékos vegetáció
világos út	0	0	0	0	236	0	0	1	0	42	0	0	10	289	81.66%	világos út
út	0	0	0	0	0	88	0	35	0	0	0	40	3	166	53.01%	út
árnyékos út	0	0	0	0	0	0	190	6	0	0	3	33	0	232	81.90%	árnyékos út
sötét panel	0	0	0	0	1	61	0	211	0	0	0	0	47	320	65.94%	sötét panel
tető 1 (piros)	0	0	0	0	0	0	0	48	104	0	2	0	0	154	67.53%	tető 1 (piros)
tető 1b (piros fényes)	0	0	0	0	55	0	0	0	130	0	0	0	0	185	70.27%	tető 1b (piros fényes)
tető 1c (piros árnyékos)	0	0	0	0	0	0	16	2	10	0	132	0	0	160	82.50%	tető 1c (piros árnyékos)
tető 2 (szürke)	0	0	0	0	0	71	49	16	0	0	0	13	15	164	7.93%	tető 2 (szürke)
tető 3 (bádóg)	0	0	0	0	0	1	0	7	0	0	0	0	130	138	94.20%	tető 3 (bádóg)
Column Total	0	124	255	207	292	221	263	326	114	172	149	86	205	2414		
Producers Accuracy	---	83.87%	70.98%	100.00%	80.82%	39.82%	72.24%	64.72%	91.23%	75.58%	88.59%	15.12%	63.41%			
Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	világos út	út	árnyékos út	panel	tető 1 (piros)	tető 1b (piros fényes)	tető 1c (piros árnyékos)	tető 2 (szürke)	tető 3 (bádóg)		Overall Class. Accuracy: 71.50%	Overall Kappa Statistics = 0.6869

Tarján

A területen 11 felszínborítási osztályt jelöltem ki (5.32. ábra), melyekhez összesen 41 foltról gyűjtöttem tanító és referencia képpontokat (10690, illetve 2665 db). A városrészben az épületek döntő része 5 vagy 10 emeletes panelház, cseréptetős épülettel csak elvétve találkozhatunk. A fény és árnyékhatások itt is jelentősek. Ennek megfelelően történt meg a 11 térképezendő kategória definiálása. Az osztályozás teljes pontossága – hasonlóan az NDVI és ISODATA módszerekhez - a három mintaterület közül itt lett a legrosszabb: 69,17% (Kappa = 0,6485). A növényzeti osztályok ez esetben is jól elkülönülnek az egyéb kategóriáktól, viszont egymás között keveredés tapasztalható. Több felszínborításnál is megfigyelhető, hogy

a User's és Producer's pontosság értékei nagyon különbözőek (*talaj (homok)*: 30 és 100%; *világos panel*: 93 és 36,76%). Tehát miközben a referencia pixelek helyesen osztályozódnak – azaz a Producer's Accuracy magas, az eredmény térképen más típusú referencia képelemek is az adott osztályba kerülnek – azaz a User's Accuracy alacsony, és fordítva. Az *út* kategória továbbra sem jól definiált, nagy keveredés mutatkozik a *sötét panelekkel* (5.9. táblázat).



5.32. ÁBRA A CIR adatok Minimum Distance osztályozásainak eredménye Tarjánban

A referencia zónákat vizsgálva megállapítható, hogy a *vegetáció* Tarjánban került legnagyobb arányban (88,64%) növényzeti osztályba. Az *út / talaj* zóna jelentős részét (35,2%) a *fű* kategória alkotja. Erre magyarázattal szolgál a városrész Ny-i szélén található egykori temető elhagyott, fokozatosan befűvesedő területe (14/C melléklet).

5.9. TÁBLÁZAT A CIR adatok Minimum Distance osztályozásának értékelése Tarjánban

Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	fényes vegetáció	világos út	út	árnyékos út	sötét panel	világos panel	tető 1 (piros)	talaj (homok)	Row Total	Users Accuracy	TARJÁN (CIR) - MinDist
Classified Data															Classified Data
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	---	Unclassified
fű	0	418	109	1	0	0	5	0	0	0	0	7	540	73.08%	fű
fa	0	80	314	0	7	0	0	0	0	0	0	0	401	78.30%	fa
árnyékos vegetáció	0	0	1	123	0	0	0	1	0	0	0	0	125	98.40%	árnyékos vegetáció
fényes vegetáció	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	88	100.00%	fényes vegetáció
világos út	0	0	0	0	0	163	0	0	1	64	0	0	228	71.49%	világos út
út	0	0	0	0	0	0	95	0	173	0	32	0	300	31.35%	út
árnyékos út	0	0	0	42	0	0	0	115	0	0	0	0	157	56.37%	árnyékos út
sötét panel	0	0	0	0	0	19	95	0	331	3	0	0	448	73.88%	sötét panel
világos panel	0	0	0	0	0	7	0	0	0	93	0	0	100	93.00%	világos panel
tető 1 (piros)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	0	64	100.00%	tető 1 (piros)
talaj (homok)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	0	40	133	30.08%	talaj (homok)
Column Total	0	498	424	166	95	189	195	116	505	253	103	40	2584		
Producers Accuracy	---	83.94%	74.06%	74.10%	92.63%	86.24%	48.72%	99.14%	65.54%	36.76%	62.14%	100.00%			
Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	fényes vegetáció	világos út	út	árnyékos út	sötét panel	világos panel	tető 1 (piros)	talaj (homok)		Overall Class. Accuracy : 69.17%	Overall Kappa Statistics = 0.6485

MAXIMUM LIKELIHOOD (ML)

A hagyományos pixel-alapú klasszifikációs algoritmusok közül a szintén irányított, parametrikus szabályt alkalmazó, statisztikai valószínűség alapján döntést hozó Maximum Likelihood eljárással is elvégeztem a képelemek osztályozását. A tanuló és referencia pixelek halmaza, illetve a vizsgált kategóriák megegyeztek az előző részben használtakkal. Az eredményeket mintaterületekre lebontva az alábbiakban mutatom be.

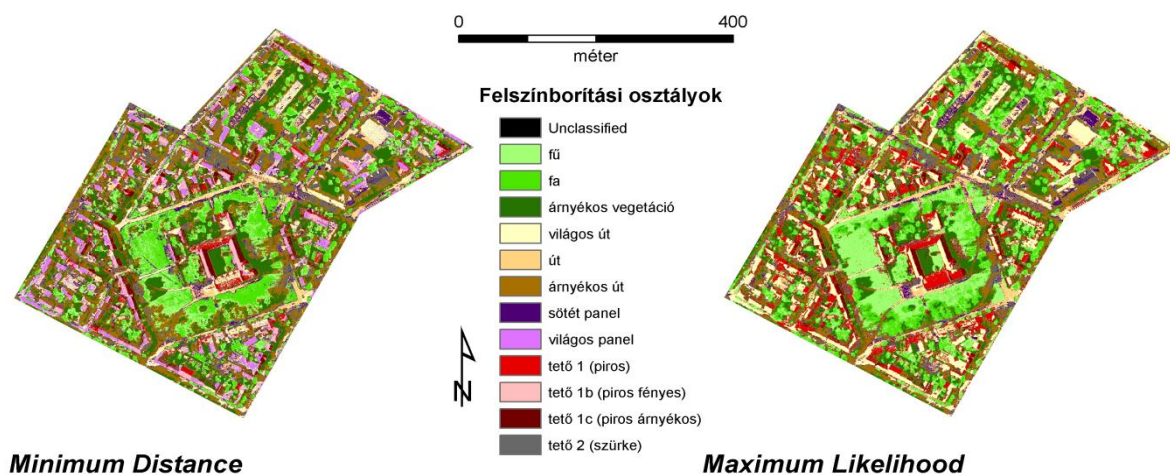
Alsóváros

Alsóvárosban az osztályozás teljes pontosság 77,76%-nak adódott (Kappa = 0,7545), ami valamivel jobb, mint a Minimum Distance eljárással kapott érték (72,55%). Ha az egyes osztályokra lebontva vizsgáljuk meg az eredményeket, látható, hogy a vegetációs kategóriákban (*fű*, *fa* és *árnyékos vegetáció*) kiugróan magas a User's és Producer's Accuracy. Kevésbé egyértelmű a javulás az útburkolatok esetében: az *út* és *világos út* osztályoknál csökkenő, az *árnyékos útnál* növekvő pontosságot figyelhetünk meg. Érdekes módon a *világos panel* és *tető 1b (piros fényes)* referencia pixelek mindegyike a *világos út* osztályba került besorolásra, amit a tanuló pixelhalmazok egymást átfedő spektrális eloszlásával magyarázhatunk. A szürke tetők (*tető2 (szürke)*) osztályozása továbbra is problémás maradt (5.10. táblázat).

5.10. TÁBLÁZAT A CIR adatok Maximum Likelihood osztályozásának értékelése Alsóvárosban

Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	világos út	út	árnyékos út	sötét panel	világos panel	tető 1 (piros)	tető 1b (piros fényes)	tető 1c (piros árnyékos)	tető 2 (szürke)	Row Total	Users Accuracy	ALSÓVÁROS (CIR) MaxLike
Classified Data																Classified Data
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Unclassified
fű	0	203	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	220	92.27%	fű
fa	0	15	166	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181	91.71%	fa
árnyékos vegetáció	0	0	0	176	0	0	0	0	0	0	0	0	0	176	100.00%	árnyékos vegetáció
világos út	0	0	0	0	108	3	0	1	48	0	122	0	0	282	38.30%	világos út
út	0	0	0	0	4	105	0	21	0	0	0	0	0	151	69.54%	út
árnyékos út	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0	0	0	129	92.25%	árnyékos út
sötét panel	0	0	0	0	0	67	0	132	0	0	0	0	0	203	65.02%	sötét panel
világos panel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	világos panel
tető 1 (piros)	0	0	0	1	6	0	0	0	0	121	0	0	0	128	94.53%	tető 1 (piros)
tető 1b (piros fényes)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	tető 1b (piros fényes)
tető 1c (piros árnyékos)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	112	0	117	95.73%	tető 1c (piros árnyékos)
tető 2 (szürke)	0	0	0	0	0	3	15	4	0	0	0	0	41	63	65.08%	tető 2 (szürke)
Column Total	0	218	183	177	118	178	134	158	48	126	122	112	76	1650		Column Total
Producers Accuracy		93.12%	90.71%	99.44%	91.53%	58.99%	88.81%	83.54%	---	96.03%	---	100.00%	53.95%			
Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	világos út	út	árnyékos út	sötét panel	világos panel	tető 1 (piros)	tető 1b (piros fényes)	tető 1c (piros árnyékos)	tető 2 (szürke)	Overall Class. Accuracy	77.76%	Overall Kappa Statistics = 0.7545

Az 5.33. ábrán összevethető a két irányított osztályozás eredménye. Legszembetűnőbben a *fű* és *fa* kategóriák javuló azonosítása figyelhető meg a Mátyás-téri templom körüli füves területen.



5.33. ÁBRA A CIR adatok irányított osztályozásainak eredménye Mátyás-téren (Alsóváros)

A 4 előre definiált referencia zónát vizsgálva elmondható, hogy az *út / talaj* területeken kismértékben (41,93% → 43,91%), a növényzeti zónában pedig jelentősen (72,93% → 81,46%) nőtt a helyesen osztályozott képelemek aránya. A területen jellemző piros cseréptetős épületek kategóriáinak együttes aránya 22,06%-ról 32,01%-ra emelkedett (15/A melléklet).

Belváros

A belvárosban jelentős javulás figyelhető meg a klasszifikáció teljes pontosságát tekintve (71,50% → 80,36%, illetve Kappa = 0,6869 → 0,7840). Kategóriákra lebontva itt is nagymértékben növekedett a különböző típusú vegetációk osztályba sorolásának megbízhatósága. A különböző út és tetőborítások esetében – néhány kivételtől eltekintve - csak kismértékű javulásnak lehetünk szemtanúi. A kivételek közül említést érdemel *tető 1b (piros fényes)* kategória növekvő false negatív pixel száma (42 → 72), melyek tévesen a *világos út* osztályba kerültek (5.11. táblázat).

5.11. TÁBLÁZAT A CIR adatok Maximum Likelihood osztályozásának értékelése a Belvárosban

Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	világos út	út	árnyékos út	panel	tető 1 (piros)	tető 1b (piros fényes)	tető 1c (piros árnyékos)	tető 2 (szürke)	tető 3 (bádóg)	Row Total	Users Accuracy	BELVÁROS (CIR) - MaxLike
Classified Data	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Classified Data
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	---	Unclassified
fű	0	119	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	153	77.78%	fű
fa	0	5	221	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	226	97.79%	fa
árnyékos vegetáció	0	0	0	207	0	0	0	0	0	0	0	0	0	207	100.00%	árnyékos vegetáció
világos út	0	0	0	0	289	0	0	3	0	72	0	0	10	374	77.27%	világos út
út	0	0	0	0	0	105	0	62	0	0	0	29	0	196	53.57%	út
árnyékos út	0	0	0	0	0	0	233	7	0	0	17	10	0	267	87.27%	árnyékos út
sötét panel	0	0	0	0	0	56	0	180	0	0	0	0	43	279	64.52%	sötét panel
tető 1 (piros)	0	0	0	0	0	0	0	0	158	0	2	0	0	160	98.75%	tető 1 (piros)
tető 1b (piros fényes)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100	100.00%	tető 1b (piros fényes)
tető 1c (piros árnyékos)	0	0	0	0	0	0	6	0	6	0	130	0	0	142	91.55%	tető 1c (piros árnyékos)
tető 2 (szürke)	0	0	0	0	0	58	24	13	0	0	0	47	1	143	32.87%	tető 2 (szürke)
tető 3 (bádóg)	0	0	0	0	3	2	0	11	0	0	0	0	151	167	90.42%	tető 3 (bádóg)
Column Total	0	124	255	207	292	221	263	276	164	172	149	86	205	2414		
Producers Accuracy	---	95.97%	86.67%	100.00%	98.97%	47.51%	88.59%	65.22%	96.34%	58.14%	87.25%	54.65%	73.66%			
Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	világos út	út	árnyékos út	panel	tető 1 (piros)	tető 1b (piros fényes)	tető 1c (piros árnyékos)	tető 2 (szürke)	tető 3 (bádóg)	Overall Class. Accuracy	80.36%	Overall Kappa Statistics = 0.7840

A létrejött kategóriákat referencia zónák alapján vizsgálva is megfigyelhető az osztályozás növekvő megbízhatósága. Az *út / talaj* és *vegetáció*val borított területeken 5-6%-kal több képelemet sikerült helyesen osztályozni, mint a Minimum Distance módszerrel (15/B és 15/C melléklet).

Tarján

A három mintaterület közül Tarjánban sikerült legnagyobb mértékben növelni a klasszifikáció pontosságát (69,17% → 81,02%, illetve Kappa = 0,6485 → 0,7829). Az algoritmus a *talaj (homok)* osztályba egyetlen referenciapixelt sem helyezett, azok mindegyike a *világos panel* kategóriába került (5.12. táblázat).

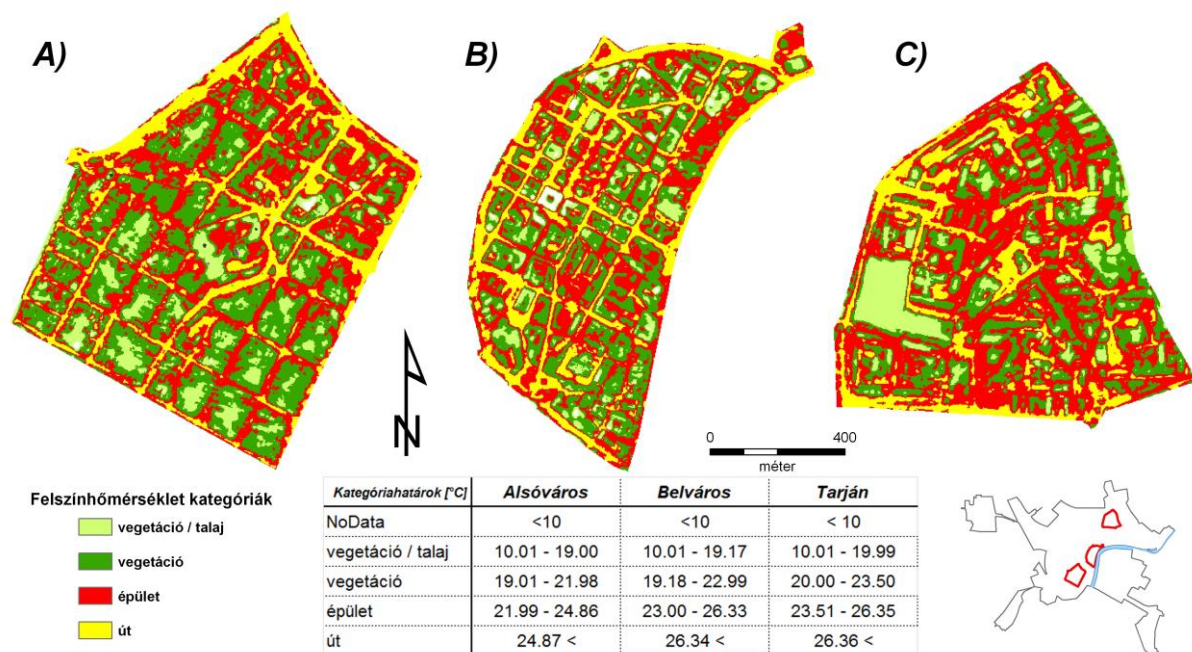
5.12. TÁBLÁZAT A CIR adatok Maximum Likelihood osztályozásának értékelése Tarjánban

Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	fényes vegetáció	világos út	út	árnyékos út	sötét panel	világos panel	tető 1 (piros)	talaj (homok)	Row Total	Users Accuracy	TARJÁN (CIR) - MaxLike
Classified Data	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Classified Data
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	---	Unclassified
fű	0	454	112	0	0	0	0	0	0	0	3	0	569	79.79%	fű
fa	0	45	311	0	0	0	0	0	0	0	0	0	356	87.36%	fa
árnyékos vegetáció	0	0	0	157	0	0	0	1	0	0	0	0	158	86.74%	árnyékos vegetáció
fényes vegetáció	0	0	0	0	95	0	0	0	0	0	0	0	95	100.00%	fényes vegetáció
világos út	0	0	0	0	0	186	0	0	0	5	0	0	191	97.38%	világos út
út	0	0	0	0	0	0	126	0	126	4	6	0	262	39.75%	út
árnyékos út	0	0	0	9	0	0	0	115	0	0	0	0	124	92.74%	árnyékos út
sötét panel	0	0	0	0	0	0	69	0	378	0	0	0	447	84.56%	sötét panel
világos panel	0	0	0	0	0	3	0	0	1	244	0	40	288	84.72%	világos panel
tető 1 (piros)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	0	94	95.92%	tető 1 (piros)
talaj (homok)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	---	talaj (homok)
Column Total	0	499	423	166	95	189	195	116	505	253	103	40	2584		
Producers Accuracy	---	90.98%	73.52%	94.58%	100.00%	98.41%	64.62%	99.14%	74.85%	96.44%	91.26%	---			
Reference Data	Unclass.	fű	fa	árnyékos vegetáció	fényes vegetáció	világos út	út	árnyékos út	sötét panel	világos panel	tető 1 (piros)	talaj (homok)	Overall Class. Accuracy	81.02%	Overall Kappa Statistics = 0.7829

A külső referencia zónák közül az *út / talaj* esetében – a *talaj (homok)* kategória kiesése miatt – csökkent a megfelelő osztályok arány (44,74% → 38,74%). A vegetációval borított térszíneken csak kismértékben (88,64% → 91,43%), az épületek zónában viszont jelentősen nőtt a pontosság (35,11% → 43,35%) (15/D és 15/E melléklet).

5.5.3. TIR adatok klasszifikációja

A hőkamerával készített légifelvételekből a teljes várost lefedő mozaik 2,5 méteres térbeli felbontásban szolgáltatott kalibrált felszínhőmérsékleti információkat két különböző időpontból (2008. augusztus 12 és 2008. augusztus 14.). A három mintaterület mindegyikén megvizsgáltam, hogy az egyes referencia zónákban hogyan oszlanak meg a hőmérsékleti értékek, illetve kategóriák. A referencia térképen – melyet a hiperspektrális adatok osztályozásánál már részletesen bemutatam (5.5.1.1. fejezet) - 4 felszínborítási kategóriát (zónát) használtam. Az egysávos TIR állományokon multispektrális osztályozó algoritmusok nem futtathatók, ezért a pixelértékek kategorizálását egyszerű küszöböléssel végeztem el. A küszöbértékeket ebben az esetben is a hisztogramok természetes töréseinél jelöltem ki. Az így definiált 4 osztály felszínhőmérsékleti határait az 5.48. ábrán mutatom be. Néhány speciális – pl. magas albedóval jellemezhető, fém – tetőborításon a hőmérsékleti értékek kalibrációja nem volt megfelelő, ezért a 10°C-nál alacsonyabb értékeket kimaszkoltam. A térképi megjelenítés mellett a referencia zónákkal és a CIR felvételek irányított klasszifikációjánál felhasznált tanulóterületekkel is kerettáblákat készítettem is értékeltem a képelemek osztályba sorolásának megbízhatóságát (16/A-C mellékletek).



5.34. ÁBRA Felszínhőmérsékleti kategóriák térképe Alsóvárosban (A), Belvárosban (B) és Tarjánban (C) a 2008. augusztus 12-i felmérés alapján

A beépített és vegetációval borított felszínek hőmérsékleti viszonyairól általánosságban elmondható, hogy legjobban a különböző út és térburkolatok – elsősorban az aszfalt – melegedik fel a nappali besugárzástól, amit aztán az éjjeli órákban fokozatosan kisugároz környezete felé. Hasonló folyamat figyelhető meg a nagy felületű panelépületek tető és oldalfalain. A hőmérsékleti skála másik oldalát a növény- és talajborítások képezik. Víztartalmuk párologtatása során környezetüktől hőt vonnak el, így lehűtik azt. Ezek a főbb jellegzetességek – intenzitásukban az aktuális klimatikus viszonyok által árnyalva – mindkét felvételezési időpontban megfigyelhetők voltak (5.34. ábra, 16/D melléklet).

Az alsóvárosi és belvárosi mintaterületen a legmagasabb hőmérsékleti kategória szépen kirajzolja az úthálózatot. Különösen a szélesebb, nagyobb forgalmú utak és nagy kiterjedésű terek azonosíthatók jól. Alsóváros egyes családi házas utcáin, ahol részben lombkorona is fedi a burkolatot, nem volt megfigyelhető jelentősebb felmelegedés. A tömbök peremén az épületek, középső részén pedig a füves-fás udvarok és kiskertek zónája különíthető el. A

nagyméretű – 2,5 * 2,5 méteres – képelem miatt ezek elhatárolása azonban egzakt módon nem megoldható. Az 5-10 emeletes panel épületekkel és közöttük elterülő parkokkal jellemezhető tarjáni mintaterületen a panel program során különböző típusú (tető és/vagy homlokzat) felújításokon átesett épületek hőkibocsátásának elemzésével igazolhatóvá vált a szigetelések hatékonysága (SZATMÁRI ET AL., 2010). Ezért sokszor a legalacsonyabb pixelértékeket éppen ezeken a tetőkön sikerült kimutatni. Itt az épületek és növényzet által a nap nagy részében leárnyékolt utcák sem melegedtek fel olyan mértékben, mint például a Belvárosban.

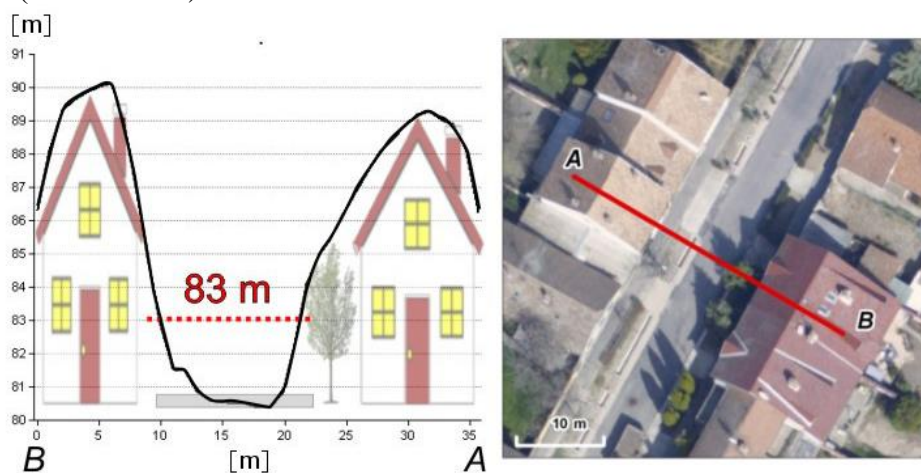
A második napi felvételezés során átlag 7°C-kal magasabb hőmérsékleteket mértem. A mérések időbeli korrigálásának ellenére (4.4.3. fejezet) Alsóvárosban megfigyelhető egy K—Ny irányú gradiens. További jelentős eltérés a két nap között a belvárosi Stefánia-parkban mutatkozott, ahol a forróbb – második – napon jobban érvényesült a növényzet hűtő hatása. Tarjánban a két adatfelvétel nem mutat jelentős eltérést (16/D melléklet).

A referencia térképekkel történő összevetésből az eltérő térbeli felbontás és a TIR felvételek pontatlan geometriai korrekciója miatt megbízható következtetéseket nem lehet levonni. Az 16/E-G mellékletekben látható, hogy az egyes városrészekben milyen eloszlásban jelennek meg az előre definiált hőmérsékleti kategóriák a referencia zónákban, illetve a CIR képek irányított osztályozásánál használt tanulóterületeken belül hogyan alakulnak a hőmérsékleti viszonyok.

5.6. A magassági és spektrális információk integrálása

A nagyfelbontású RGB légifelvételekből kinyert magassági információk alapján (5.3. fejezet) a spektrális osztályozás eredményei tovább pontosíthatók. A városi környezetben több olyan anyaggal is találkozhatunk, melyek - más-más felszínborítási kategóriát képezve - különböző magassági szinteken is előfordulnak. Erre a legjobb példát az útburkolatok és a panel blokkos épületek tetőborítása szolgáltatja. A spektrálisan hasonló képelemek egymástól jelentősen eltérő magasságú felszíneket reprezentálnak.

A sztereo-fotogrammetriai módszerekkel előállított felszínmodell (DSM) felhasználva megvizsgáltam, hogy a kizárólag spektrális információkból levezetett osztályok pixeleinek besorolása hogyan változik a magassági adatok alapján végzett küszöbölés hatására. Az irányított osztályozások út és épület kategóriáinak mindegyikét két részre bontottam, melyhez mintaterületenként más-más magassági küszöbértéket használtam fel. A küszöbértékek megállapításához a DSM-ről utca keresztmetszvényeket vettem fel, illetve az épület referencia zónára alapstatisztikákat számoltam (5.35. ábra). Ennek eredményeképpen Alsóvárosban 83, Belvárosban 92, Tarjánban pedig 82 méteres magasságban definiáltam az utca/tető szint határértéket (5.3. táblázat).



5.35. ÁBRA Tipikus utca keresztmetszvény Alsóvárosban

Az eredeti – csak spektrális információkon alapuló – osztályokat átkódoltam és a magassági – utca vagy tetőszint – kategóriák szerint kettéosztottam (17/A melléklet).

Az újonnan létrehozott osztályok - a várakozásoknak megfelelően - nagyobb arányban tartalmaztak helyesen besorolt képelemeket. Ezt egy 2 kategóriás (épület / nem épület) referencia állománnyal végzett kereszttáblás vizsgálattal sikerült igazolni. Elsőként az eredeti irányított osztályok pixeleinek eloszlását néztem meg az épület és nem épület zónák között (5.13. táblázat, 1. % oszlop, 17/B melléklet).

5.13. TÁBLÁZAT A felszínborítási kategóriák pixeleinek eloszlása az épület és nem épület zónák között az eredeti osztályok és a magassági információk alapján újradefiniált (kettévágott) osztályok alapján (CIR adatok, Maximum Likelihood osztályozás)

Alsóváros

Magassági információk nélkül definiált osztályok			nem épület (tszfm < 83m)	épület (tszfm > 83m)	Magassági információk nélkül definiált osztályok			nem épület (tszfm < 83m)	épület (tszfm > 83m)
világos út	[%]		[%]	[%]	tető 1 (piros)	[%]		[%]	[%]
épület	7,29	→	10,06	66,94	épület	43,19	→	9,45	66,33
nem épület	92,71		89,94	33,06	nem épület	56,81		90,55	33,67
út					tető 1c (piros árnyékos)				
épület	24,29	→	4,8	58,61	épület	48,69	→	10,84	71,15
nem épület	75,71		95,2	41,39	nem épület	51,31		89,16	28,85
árnyékos út					tető 2 (szürke)				
épület	23,52	→	4,5	53,93	épület	24,23	→	4,58	58,34
nem épület	76,48		95,5	46,07	nem épület	75,77		95,42	41,66
sötét panel									
épület	30,3	→	5,33	63,87					
nem épület	69,7		94,67	36,13					

Jól láthatóan minden városrészben voltak olyan alapvetően tetőként definiált osztályok, melyek képelemeinek nagy része nem épület zónába esett, és fordítva: sok esetben az útburkolati kategóriák egy részénél is túlsúlyba kerültek az épületekre eső pixelek (pirossal kiemelve). Az osztályok magassági zónák szerinti felosztása ezt a hibát a legtöbb esetben korrigálta (5.13. táblázat, 2. és 3. % oszlopok). A CIR adatok esetében az új kategóriákban – két kivételtől eltekintve, melyek Tarjánban az *árnyékos út* és a *tető 1 (piros)* pixelhalmazból levezetett tetőszintű osztályok - már mindenütt többségben vannak (>50%) a helyes referencia zónába eső képelemek. Utca szinten ez az érték általában a 80-90%-ot is meghaladja. A továbbra is hibásan osztályozott képelemek – a tetőszinten néhol nagyarányú (30-40%) – jelenléte a távérzékelte felvételek pontatlan geometriájával és a perspektív leképezésből eredő „kidőlő” épületekkel magyarázható.

Az ellenőrzés második lépésében már csak az épület referencia zónát vizsgálva kiszámítottam, hogy az eredeti és az újradefiniált osztályok milyen arányban részesednek e zónán belül (5.14. táblázat, 17/C melléklet). A magassági információk bevonásának az előzőekben már bizonyított kedvező hatása itt is tetten érhető. Egyrészt az új, utca szintű osztályok pixelei már csak néhány százalékban jelennek meg az épületekben, másrészt néhány, eredetileg elsődlegesen útburkolati típusként definiált kategóriáról (pl. *világos út*) kiderült, hogy képelemeinek nagy része valójában tetőket reprezentál. Az új tetőszintű osztályok az épület zónát 70-80%-ban fedik le. A maradék területeken az – osztályozási és geometriai hibák mellett – a növényzet kitakaró hatásával is számolni kell.

5.14. TÁBLÁZAT Az épület zóna területének megoszlása az eredeti és a magassági információk alapján újradefiniált (kettévágott) osztályok között (CIR ADATOK, MAXIMUM LIKELIHOOD OSZTÁLYOZÁS)

Alsóváros	eredeti osztályok			épület (tszfm > 83m)		eredeti osztályok			épület (tszfm > 83m)
		[%]	nem épület (tszfm < 83m)				[%]	nem épület (tszfm < 83m)	
világos út	22,99	→	2,27	20,98	tető 1 (piros)	20,08	→	1,76	18,1
út	6,30	→	0,81	5,54	tető 1c (piros árnyéko	7,92	→	0,63	7,09
árnyékos út	15,32	→	1,68	12,68	tető 2 (szürke)	9,38	→	1,09	8,04
sötét panel	4,67	→	0,47	4,19					
								Total:	76,62

A felületmodell információtartalmát - az előzőekben bemutatott módszertan szerint - a hiperspektrális állományból levezetett osztályokkal is integráltam. A legnagyobb pontosságot az MNF transzformált képek Maximum Likelihood klasszifikációjával sikerült elérni (86,54% Overall Accuracy, ld. 5.5.1.2. fejezet), így erre alkalmazva mutatom be a magassági küszöbölés hatásait.

Összességében az eredmények a fentiekhez hasonló következtetések levonását tették lehetővé. A 21 kiindulási osztály közül 17 került feldarabolásra. Kettő kivételével (*műanyag tető* és *sötét, piros díszburkolat*) az új kategóriák pixeleinek nagyobb része a nekik megfelelő referencia zónában volt megtalálható. Látványos javulás figyelhető meg szinte az összes tetőborítás esetében: ezek nagy része eredetileg hibásan a nem épület zónába esett, míg a felosztást követően „kitisztultak”, és 70-80%-ban a nekik megfelelő referencia területre kerültek (*17/D és 17/E mellékletek*).

5.7. Osztályozási módszerek értékelése és a térbeli kiterjesztés lehetőségei

A következőkben felszínborítási kategóriánként megvizsgálom, hogy a különböző alapadatok, illetve az egyes információkinyerési eljárások, osztályozó algoritmusok közül melyek szolgáltatják a legnagyobb megbízhatóságot. Ezt követően röviden áttekintem a – más városrészekre vagy a város teljes területére történő – térbeli kiterjesztés lehetőségeit is.

5.7.1. Optimális adattípusok és algoritmusok

Az előző alfejezetek tapasztalatai alapján elmondható, hogy pusztán a távérzékelte felvételek térbeli vagy csak spektrális információtartalma alapján sok esetben nem térképezhetők megfelelő pontossággal a városi felszínborítások. Az ISODATA klaszterezés esetében egyrészt problémát okoz az adathalmazonként egymással nehezen párhuzamosítható osztálystruktúra, illetve – nagyszámú terepi referencia adat hiányában – nem lehetséges az eredmények egzakt értékelése sem. Az irányított osztályozások közül a Maximum Likelihood módszer szolgáltatta minden esetben a legnagyobb pontosságot. A hiperspektrális állományok képelemeinek részletes, 21 különböző kategóriába sorolása 86%-os teljes pontossággal sikerült, míg a színes-infravörös (CIR) felvételeknél ez az érték – mintaterülettől függően 11-12 osztállyal – 80% körüli volt. A minimális spektrális távolságon alapuló eljárás megbízhatósága ettől jelentősen elmaradt, függetlenül a forrásadatoktól. A képelemek térbeli kapcsolódásait is figyelembe vevő, szegmens alapú osztályozással 79%-os legnagyobb teljes pontosságot sikerült elérni. Ezt az RGB és AISA Dual felvételek spektrális, illetve a származtatott felszínmodell magassági információi együttesen eredményezték. A DSM réteg pixel szintű integrálásával sikerült a spektrálisan hasonló osztályokat tovább pontosítani.

Az egyes kategóriákat vizsgálva megállapítható, hogy a jellegzetes spektrális tulajdonságokat mutató *vegetáció* elkülönítése sikerült a legjobban. Az adattérben jól elkülönülő pixeleket már az automatikus ISODATA eljárás is szépen elhatárolta, míg a legmegbízhatóbbnak ítélt Maximum Likelihood (ML) módszerrel 90-95% fölötti User's és Producer's pontosságokat sikerült elérni mindhárom városrészben (5.15. táblázat). A *tetőborítások* közül a leggyakrabban előforduló *piros cserepek* azonosítása volt a legegyszerűbb. A legnagyobb pontosságot szolgáltató szegmens alapú módszer 90% feletti megbízhatósága mellett a pixel alapú osztályozásoknál is 80-90% közötti értékek adódtak. A *színes* – lila, szürke – *cserepek* esetében a szegmens alapú és az MNF transzformált hiperspektrális adatok ML klasszifikációja bizonyult a legjobbnak, ami azonban így jelentős hibákkal terhelt. A viszonylag kis elemszámú *speciális tetőborítások* osztályozási pontossága – a mintákhoz hasonlóan – nagy szórást mutat. A pala, fém és műanyag tetőket a PCA transzformált AISA Dual felvételekből sikerült leghatékonyabban kinyerni. A *lakótelepeken*

gyakori, aszfalt alapú tetőburkolatok szintén a nagy spektrális információtartalmú hiperspektrális állomány alapján térképezhető legpontosabban. Az *útburkolatok* közül az *aszfalt* felszíneket az AISA adatok pixel alapú, a *beton* felületeket a több adatforrást integráló, szegmens alapú eljárásokkal sikerült legnagyobb megbízhatósággal azonosítani (5.15. táblázat).

5.15. TÁBLÁZAT A főbb felszínborítási kategóriák osztályba sorolásának megbízhatósága különböző input adatok és algoritmusok szerint

Input adat (módszer) [%]	RGB + hiper (MNF) + DSM (szegmens)		hiper (PCA / ML)		hiper (MNF / ML)		CIR (MD)		CIR (ML)	
	User's	Producer's	User's	Producer's	User's	Producer's	User's	Producer's	User's	Producer's
Növényzet	86.96	86.95	95.39	96.12	98.91	97.69	79.84	80.15	91.71	92.80
piros cserép	96.06	92.51	75.64	86.24	84.27	90.19	89.94	78.67	85.37	79.06
színes*	89.52	59.21	68.41	60.27	69.28	73.44	32.54	26.23	48.98	54.30
speciális**	100.00	76.06	100.00	96.97	93.33	85.71	94.20	63.41	90.42	73.66
panel	65.52	100.00	90.55	86.67	76.41	83.42	64.41	55.00	60.59	64.21
aszfalt	70.08	62.07	94.20	89.08	90.10	87.86	64.27	71.39	72.01	81.84
beton	75.89	100.00	63.64	77.78	54.55	60.00				

* lila és szürke cserép ** pala, fém és műanyag tető

Az alkalmazott osztályozó algoritmusok köre a jövőben tovább bővíthető. Az eddig tesztelt – alapvetően multispektrális adathalmazokra fejlesztett – Minimum Distance és Maximum Likelihood eljárások mellett mindenképpen érdemes lenne már speciálisan nagydimenziójú állományokra optimalizált megoldások alkalmazása. A növényzet pontosabb és részletesebb osztályozása érdekében a hiperspektális adatok előnyeit jobban kihasználó, keskeny sávú vegetációs indexek tesztelése is javasolt.

5.7.2. Szeged város felszínborítási térképe – lehetőségek és kérdések

A mintaterületeken lefutott elemzések akkor tekinthetők valóban eredményesnek, ha azok alapján a teljes városra – optimális esetben más, hasonló beépítési tulajdonságokkal jellemezhető településekre – is képesek vagyunk felszínborítási térképet készíteni. A következőkben áttekintem ennek feltételeit és lehetséges problémáit. A fejezet végén kísérletet teszek – a rendelkezésre áll adathalmazok felhasználásával – a korábbi elemzések kiterjesztésére is.

A legfontosabb követelmény az input adatok teljes területi lefedettsége, melyet esetemben a CIR, TIR és nagyfelbontású RGB felvételek teljesítenek. Az AISA Dual hiperspektrális felvételezés csak 2007-ben készült el a teljes városra, a 2009-es és 2010-es csak a kiválasztott mintaterületeket fedi le. A nyers állományok geometria korrekciója minden esetben – változó pontossággal – megtörtént. A képkészítő rendszerek (CIR, TIR, RGB) esetén az egyedi felvételeket egymással radiometriailag is egyeztetni kell. Ehhez elengedhetetlen a szenzorok részletes kalibrációja, ami CIR kamera esetében nem volt kivitelezhető. Kisebb területen a szomszédos képek hisztogramjainak illesztése ebben az esetben megoldható, de a különböző időpontok adatai egymással nem összevethetők. A hőkamerás felvételek kalibrációjára kidolgozott módszer létezik (4.4.3. fejezet). A Trimble kézikamera laboratóriumi kalibráción esett át, így megfelelően kivitelezet mozaikolást követően nagy területekről homogén minőségű adatot szolgáltat. A pásztázó AISA Dual szenzor adatainak előfeldolgozására a Caligeo szoftverkomponens teljes megoldást nyújt (4.4.5. fejezet). A 2009-es és 2010-es adatok atmoszférikus korrekciója modell, illetve terepi referencia méréseken alapuló (empirical line) módszerrel történt (4.4.5.4. fejezet).

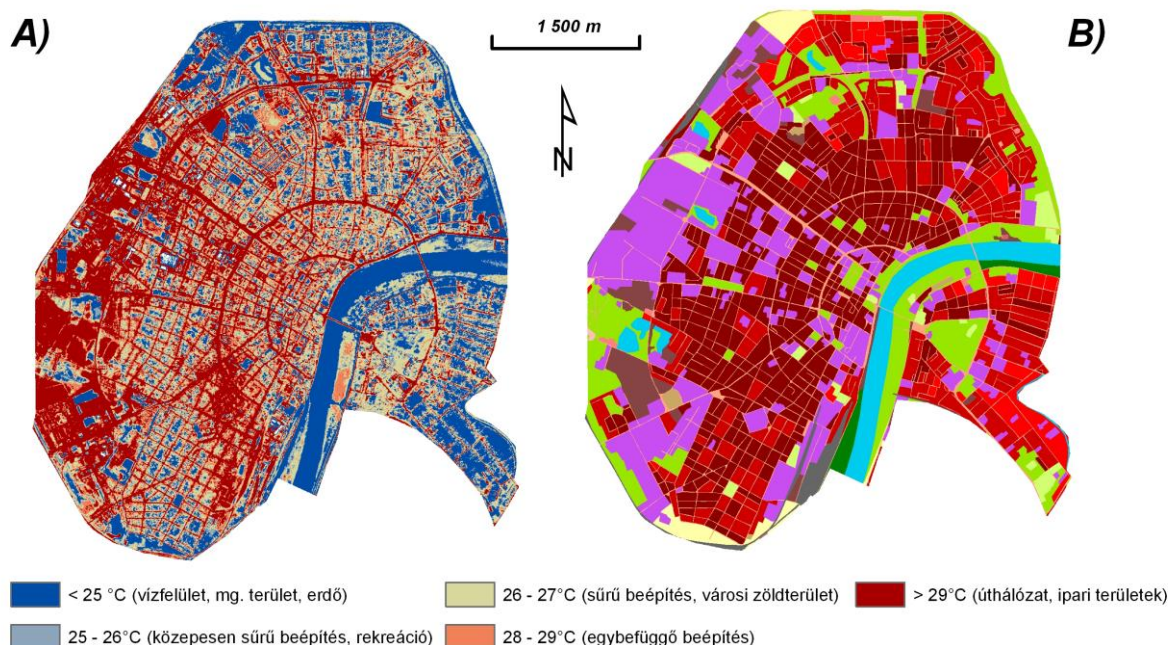
A mintaterületeken végrehajtott elemzések kiterjesztése során felmerülhet a kérdés, hogy az ott kijelölt tanuló területek alkalmasak-e a teljes város reprezentálására. Meglátásom szerint a hiperspektrális állományon alkalmazott 21 elemű osztálystruktúra is sok helyen bővítésre szorul. Olyan fontos – a város egyéb részein jelentős arányban megjelenő – kategóriák maradtak ki, mint a víz- és csupasz talajfelszínek vagy a mezőgazdasági művelés alatt álló területek. Az automatikus osztályozások (ISODATA) esetében a számított osztályközepek mindig a bemenő adathalmaz statisztikai paramétereinek függvényében alakulnak. Ebből következően a teljes városra futatott algoritmus klaszterei nem feleltethetők meg automatikusan és egyértelműen a mintaterületeken számítottakkal. Másrészt viszont ezzel összevethetővé válhatnak a különböző városrészek felszínborítási térképei (5.37. ábra).

Az előzőekben részletezett követelményeket és problémákat szem előtt tartva az elemzések térbeli kiterjesztésnek néhány példáját mutatom be.

5.7.2.1. TIR felvételeken alapuló „területhasználati térkép” Szeged városára

A kalibrált felszínhőmérsékletek alapján levezetett felszínborítási kategóriák meghatározásához megvizsgáltam, hogy az egyes Urban Atlas osztályok milyen hőmérsékleti paraméterekkel jellemezhetők (18/A melléklet). Az átlagértékek alapján elmondható, hogy – az előzetes várakozások szerint – a közlekedési infrastruktúra és az ipari területek felmelegedése volt a legjelentősebb ($>29^{\circ}\text{C}$). A másik végletet a vízfelületek, az erdők és a beépített területet határoló mezőgazdasági táblák jelentették ($<25^{\circ}\text{C}$).

A fentiek alapján 5 osztályba soroltam a teljes városi TIR mozaik pixeleit. Az így létrejött „területhasználati térkép”-et az Urban Atlas-szal összevetve jól kirajzolódik a közút hálózat, a nyugati rész ipari parkjai, a Tisza és a várost övező mezőgazdasági terület (5.36. ábra).

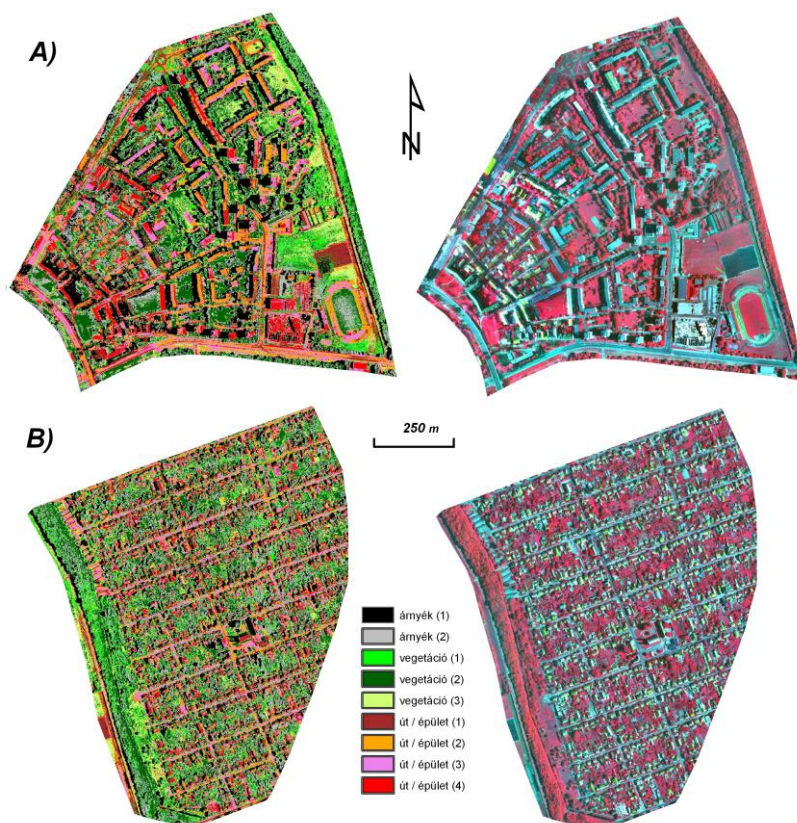


5.36. ÁBRA A kategorizált felszínhőmérsékleti térkép (A) és az Urban Atlas (B) Szeged körtöltésén belüli részén (2008.08.14) (Urban Atlas jelkulcs: 3.1. táblázat)

5.7.2.2. CIR adatok automatikus (ISODATA) klaszterezésének térbeli kiterjesztése

A CIR felvételekből készített mozaik ISODATA klaszterezését a város teljes területére is végrehajtottam. A mintaterületeknél már ismertetett beállítások (10 osztály, max. 10

iteráció, 0,95-ös konvergencia küszöb) mellett a létrejött osztályok csak részben feleltethetők meg a korábban bemutatottakkal. Könnyen elkülöníthetők az árnyékos, a vegetációt reprezentáló és a beépített térszínek kategóriái. Utóbbiban azonban további differenciálás itt sem lehetséges. Mivel az algoritmus nem igényel jelentős számítási kapacitást, azt érdemes a teljes mozaikon lefuttatni, így lehetővé válik a városrészek összehasonlítása is (5.37. ábra). A módszer alkalmas lehet nagyobb területek növényzettel borított és beépített térszíneinek gyors elkülönítésére.



5.37. ÁBRA A CIR adatok egységes ISODATA klaszterezése Felsővárosban (A) és Petőfitelepen (B)

5.7.2.3. RGB szegmentáció és magassági információ kinyerés nagy területen

A nagyfelbontású Trimble kézikamera valós színes felvételeiből készített ortofotó mozaik hatalmas információ mennyiséget tárol. Az 5.3-5.4. fejezetekben részletezett módszerek alkalmazása a város teljes területére elsősorban idő és számítási kapacitás problémákba ütközik. A teljes állomány megközelítőleg 4 milliárd képelemből épül fel (67500x60000 pixel). A három sáv 8 bites tárolással 11 GB méretű. Fontos előnye ugyanakkor, hogy a város teljes területén – geometriai és radiometriai értelemben egyaránt – homogén minőségű adatot szolgáltat.

A magassági információk kinyerése már egy kisebb városrész esetén is problémás. Adott területen a származtatott magassági információk minősége arányos a mért pontok számával. Számítógépeink jelenlegi kapacitása mellett a feldolgozás optimális térbeli kiterjedése nem terjed túl néhány háztömbön. A mozaik feldarabolásával, a műveletek köteget futtatásával a térbeli kiterjesztés megoldhatóvá válhat.

Az általam alkalmazott *multiresolution* szegmentálás képelemről képelemre vizsgálja a hasonlósági kritériumokat. Az iteratív folyamat több milliárd pixel esetében hosszú időt venne igénybe. Itt is megoldást jelenthet a mozaik darabolása és/vagy a geometriai felbontás csökkentése, illetve a szegmentáció paramétereinek (*scale*) megfelelő megválasztása. Egy fentről lefelé építkező objektumhierarchiával előbb a nagyméretű homogén objektumok (pl.

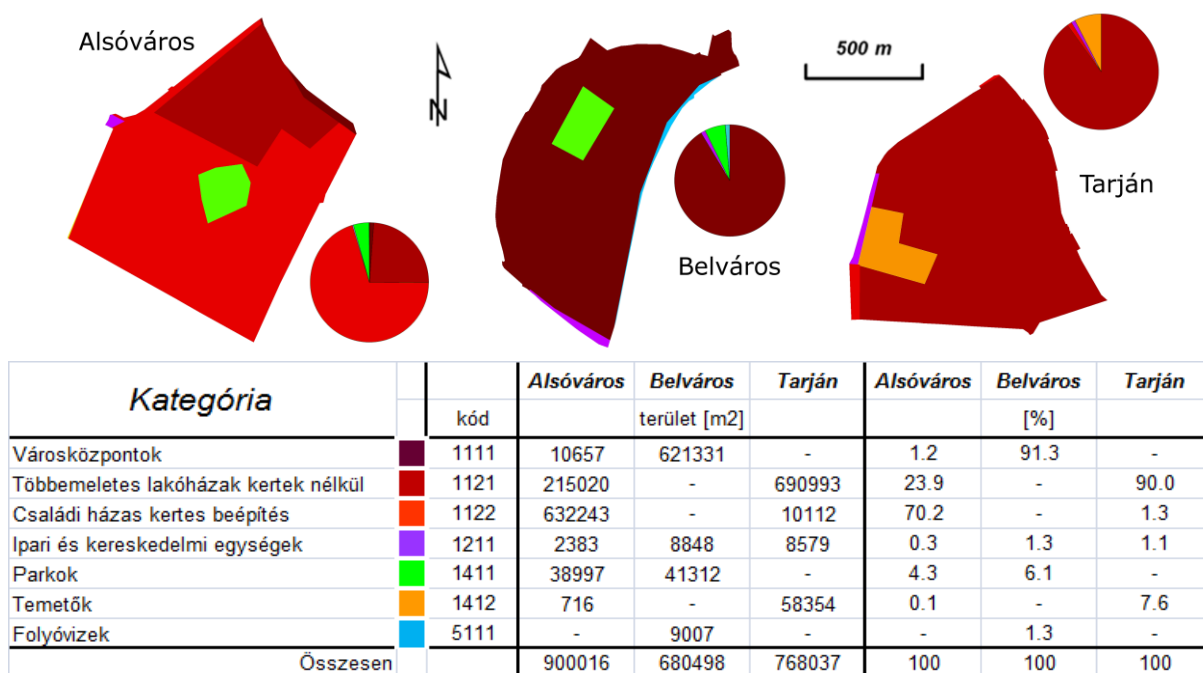
folyó, parkok, ipari területek vagy akár városrészek) határolhatók le. A különböző beépítéssel rendelkező városrészekben belül más-más beállításokkal közelíthetők a valós objektumhatárok. Éppen ezért indokolt lehet a műveletek városrészek szerinti definiálása.

5.8. Különböző funkciójú és beépítettségű városrészek jellemzése

Az egyes mintaterületek felszínborítását és területhasználatának térbeli eloszlását CLC50 és Urban Atlas adatok alapján elemezhetjük. A 3. fejezetben bemutatott adatbázisokat referenciaként felhasználva megvizsgáltam, hogy az általam osztályozott felszínborítási osztályok milyen térbeli kapcsolatban vannak - hogyan illeszkednek, illetve milyen arányban részesednek - a CLC50 és Urban Atlas zónákkal

5.8.1. A mintaterületek jellemzése a CLC50 adatbázis alapján

A Corine Land Cover adatbázis 1:50000-es méretarányú rétegén a legkisebb térképezett objektum mérete 4 ha. Ennek megfelelően a 70-90 hektáros mintaterületek elemzése csak a jelentős generalizálást figyelembe véve történhet meg. Összesen 7 kategóriával találkozhatunk a kijelölt városrészekben, melyek közül egy kivételével (5111 – folyóvizek) mindegyik a mesterséges felszínnek közé tartozik (5.38. ábra).



5.38. ÁBRA CLC50 kategóriák megoszlása a vizsgált városrészekben (1998)

Alsóvárosban a *kertes családi házak* dominálnak 70% körüli arányukkal. Az északi rész *többszintes tömbházai* (23%) mellett a *Mátyás-tér zöldfelülete* (4,3%) jellemzi leginkább a városrészt.

A **Belvárosban** a *városközpontok* kategória egyeduralmát (91%) csak a *Széchenyi-téri parkok* (6,1%) törik meg. A mintaterület lehatárolásának pontatlanságából adódóan a Tisza egy része *folyóvízként* jelenik meg a statisztikában. Hasonló okokból a déli részen az *Új-klinika* többjét reprezentáló – ipari, kereskedelmi és – *szolgáltató zóna* is érinti a területet.

Tarján városrészben a *többszintes – 5-10 emeletes – panel épületek* zónája dominál (90%), a kategória – kertek nélküli – jelzőjével ellentétben, jelentős zöldterületeket is

magában foglalva. Az 1990-es évek végén még *temető*ként funkcionáló, ma már felhagyott terület részaránya szintén jelentős (7,6%). A CLC50 térképezés módszertanának következményeként az 1 hektárnál kisebb kiterjedésű Zápor-tó vízfelülete nem jelenik meg az adatbázisban.

5.8.2. A mintaterületek jellemzése az Urban Atlas adatbázis alapján

Az Urban Atlas adatbázis a CLC50-től frissebb és nagyobb térbeli felbontású, de attól eltérő osztálystruktúrával rendelkezik. Összesen 8 különféle beépítési típus, illetve területhasználat jelenik meg a vizsgált területeken, melyek térbeli mintázata sokkal pontosabban közelíti a valóságot, mint a CLC50 állomány (18/B melléklet). Ezt a bemenő adatok nagyobb változatosságával, illetve azok fejlettebb feldolgozási módszertanával magyarázhatjuk. A legkisebb térképezett objektum mérete már 0,25 ha.

A három terület közül **Alsóvárosban** a legmagasabb (90%) a - 80%-ot meghaladó talajborítottságot jelentő - *egybefüggő beépítés* (11100) aránya. A háztömbök kb. 1/3-án – a mintaterület 20%-án – már nagyobb szerepe van a nagyobb belső udvarral, kerttel rendelkező *családi háznak* (11210). Az 5 szintes épületek tömbjei nem kerültek külön osztályba. Az oktatási intézmények és a Mátyás-tér egésze – funkciójának megfelelően – az *ipari, kereskedelmi, közösségi* kategóriába (12100) lett besorolva. Önálló osztályként jelentek meg az *úthálózathoz* tartozó felszínek (12220), melyek a teljes terület 11,5%-át fedik.

A **Belvárosban** közelítőleg 1/3 – 1/3 arányban találkozhatunk *egybefüggő* – lakás célú – *beépítéssel* (11100) és *ipari, kereskedelmi és szolgáltató* funkciókkal (12100). A CLC50 rétegen még szinte teljesen homogén városrészben már jól elkülönülnek a különböző területhasználatok. A nagy parkok a nekik megfelelő *városi zöldterület* (14100) osztályba kerültek (13,4%). A *közlekedési infrastruktúra* (12220) részesedése ezen a mintaterületen a legmagasabb (19%).

A **tarjáni** lakótelep területének több mint fele (54%) a *nem-egybefüggő*, de *sűrűn beépített* (11210) kategóriába esik. A DNy-i és ÉNy-i részeken – az adatbázis szerint - *egybefüggő beépítés* (11100) jellemző, ami azonban a valóságban alig tér el a kerület egyéb részeitől. Az *út és utca hálózat* (12220) 10%-os aránya mellett említést érdemel még a nagy kiterjedésű *felhagyott temető* (13400) (5,5%) és a Zápor-tó körüli *városi zöldterület* (14100) (3,9%). A vízfelület most sem jelenik meg önálló kategóriaként.

A következőkben megvizsgáltam, hogy a részletesebb, 2006-os állapotokat tükröző Urban Atlas térkép egyes kategóriáin belül hogyan oszlanak meg az általam – különböző bemenő adatokkal és módszerekkel – generált felszínborítási térkép osztályai. Az összehasonlításhoz a – belső pontosság ellenőrzések alapján – legmegbízhatóbbnak ítélt (Overall Accuracy = 86,54%) MNF transzformált hiperspektrális adatok Maximum Likelihood osztályozását választottam.

Első körben az összehasonlítást csak a három kijelölt mintaterületen végeztem el (18/C melléklet). A *legsűrűbb beépítéssel* jellemzett (11100) kategória majd felét épületek (tetőborítások) foglalják el. Ahogy a teljes vizsgált területen, itt is a különböző állapotú piros cseréptetők dominálnak. Főként belső telekrészekben nagy arányban (~20%) jelennek meg a különféle szilárd burkolatok is, melyek így elkülönülnek az Urban Atlas önálló utak (12220) kategóriájától. Az elsődlegesen lakó funkciókkal bíró zónák (11100-11220) közül értelemszerűen itt a legkisebb a növényzeti borítás (~31%). Az Urban Atlas csökkenő talajborításával párhuzamosan (11100→11220) csökken az épületek és növekszik a vegetáció aránya. Mivel a *közepesen sűrű beépítés* (11220) csak minimális területen jelenik meg, az útburkolatok abban tapasztalható megugró aránya nem mérvadó. Az *ipari, kereskedelmi* funkciókat ellátó területeken (12100) ismét nagyobb részt épületeket és aszfaltozott felszíneket találhatunk. Az *úthálózat* (12220) jelentős tető- és vegetáció borítása (~63%) a

geometriai hibák, a perspektív leképezés és az utcák fölé benyúló lombkoronák eredménye. Az egykori tarjáni temető – ma már felhagyott (13400) – területén és a városi zöldövezetekben (14100) természetesen a vegetáció dominál.

Következő lépésként már a hiperspektrális pászta teljes területén vizsgáldtam (18/D melléklet). Három új Urban Atlas kategória jelent meg: az alacsony sűrűségű városi beépítés (11230), a vasút infrastruktúra területei (12230) és a mezőgazdasági művelés (20000). Lényegében hasonló – a nagyobb kiterjedés miatt hitelesebb – tendenciák és következtetések állapíthatók meg, mint korábban: a csökkenő beépítéssel párhuzamosan csökken a tetőborítások és egyéb burkolt felületek, illetve növekszik a vegetáció aránya. A teljes pásztát vizsgálva még gyakoribb az utcák egy részét kitakaró lombkorona. A vasúti pályát (12230) füves-fás területek szegélyezik. A városi zöldterületeken (14100) kevesebb épület és útburkolat jelenik meg, növelve ezzel a vegetáció arányát. Viszonylag jelentős – a vizsgált felszín több mint 8%-át kitevő – mezőgazdasági terület túlnyomó részt szintén növényzettel borított.

Összességében elmondható, hogy az általam készített felszínborítási térképek nagyobb térbeli részletességgel, de – az alkalmazott módszertan különbözőségéből adódóan – részben eltérő tematikájukkal jól igazodnak a nagy nemzetközi térképezési kampányok eredményeihez. Fontos megemlíteni, hogy ezáltal jobban alkalmazhatók a helyi, lokális léptékű térbeli döntéshozási folyamatokban.

5.8.3. A felszínborítás és a felszínhőmérséklet kapcsolata

A 2008. augusztus 12-i és 14-i felvételek alapján öt kiválasztott mintaterületen elemeztem részletesen a felszínhőmérséklet térbeli eloszlását és kölcsönhatását a felszínborítással, illetve a beépítéssel. A 19.sz. mellékletben a hőkamerával készült felvételek mellett az adott terület színes légifelvételei is láthatóak. Miután ezek a felvételezések a város egészére kiterjedtek, a korábban használt mintaterületektől eltérő, azoknál változatosabb felszíneket vizsgálhattam meg (RAKONCZAI ET AL., 2009).

Sűrű beépítésű övezet (Belváros, Dóm-tér és környéke)

A város központi része a Dóm tér és környezete (19/A melléklet). A sűrű és magas beépítés ellenére a területen - a klinikák udvarán és a Tisza-parti sétányt szegélyezve - több helyen is előfordul fás vegetáció. A hőkamerás felvételen jól látható, hogy az útfelületek és a közterek nagyobb burkolt felszínei melegek fel legjobban. Ezek hőmérséklete még egy órával az alkonyat után is 30–40°C. A viszonylag egységes hőmérsékletű Tisza (a folyó ekkor 20–22,5°C-os volt) mellett megfigyelhető, hogy a rakparti út délutánra árnyékba kerülő részei már 2–3°C-kal hűvösebbek. A kép középső részén – a Dóm-téren - tisztán kirajzolódnak a szabadtéri színház nézőterének szektorai. Jól látható, hogy a Tiszán levő úszóház és a folyó melletti bokros-fás terület is hidegebb környezeténél. Emellett érdemes megjegyezni, hogy még a nagyobb fák sem képesek kellő védelmet adni a nagy felmelegedés ellen, ha nincs lehetőségük a tágabb környezetük felé való szellőzésre (35°C körüli értékek az erdős területen). A képen több 15°C körüli – hibás - felszín is látható. Ezeken a nagyobb kiterjedésű fém felületeken szükséges lett volna a műszert külön is kalibrálni. E zavaró tényező miatt a légkondicionálással hűtött, ténylegesen alacsonyabb hőmérsékletű épületek – mint például a Somogyi könyvtár a Dóm-tól nyugatra, illetve több klinikai egység, hivatali épület - és a fémborítású épületek elkülönítése külön eseti vizsgálatokat igényel (RAKONCZAI ET AL., 2009).

Ipari területek és zártkertes övezetek (Boszorkány-sziget és Hattyas)

A Boszorkány-szigetet, Hattyastelepet és a Rendező pályaudvart ábrázoló augusztus 12-i felvételen különböző felszínborítású – zöldfelület, családi házas-kiskertes és ipartelep jellegű – területek felszínhőmérsékleti viszonyait vizsgálhatjuk (19/B melléklet). A legalacsonyabb hőmérsékleteket (12–13°C) a gyepterületeken figyelhetjük meg. Az árvízvédelmi töltésen és alacsonyabb, bokros-fás vegetációjú környezetében 16–18°C, a vasúti pálya töltésén 23°C, a hullámtéri erdő koronaszintjében 24°C, míg a szilárd burkolatú utak és az ipartelepek aszfaltfelületein 28–32°C átlagos hőmérsékletet mértem. Az értékek jelentős terjedelmét (közel 20°C) a nappali besugárzást kisebb mértékben elnyelő füves területek és a jó hőelnyelő – és kisugárzó – burkolt felületek erős fölmelegedése közötti kontraszt okozza. A folyó közelsége – jó hőtároló kapacitása és kis hőingadozása miatt – egyfajta kiegyenlítő hatást gyakorol a part menti területekre. A hullámtéri erdős-fás terület szintén pufferként működhet: napközben a lombkorona védi a felszínt az erős besugárzástól, éjjel pedig akadályozza a kisugárzást. A szomszédos családi házas és kiskertes övezetben, az aszfalt burkolatú utcákon az erős felmelegedést a növényzeti borítottság mérsékli (RAKONCZAI ET AL., 2009).

Lakótelep és bevásárlóközpont (Északi városrész)

A következő kivágat az Északi városrész, Rókus és Makkosháza egy részét fedi le (19/C melléklet). A területen a körút mentén öt- és tízemeletes panel épületekkel, közöttük pedig kisebb nagyobb zöldfelületekkel (parkok és a város legnagyobb összefüggő erdeje) találkozhatunk. Domináns objektumként egy bevásárlóközpont jelenik meg parkolójával együtt. A külső körgyűrű részét képező Rókusi körút a város egyik legforgalmasabb közlekedési útvonala. A négysávós aszfaltút felszínének átlagos hőmérséklete – hasonlóan az áruház melletti parkolóhoz - még napnyugta után 1 órával is 34°C volt. A légkondicionált bevásárlóközpont tetején ezzel szemben csak 13–23°C-os hőmérséklet figyelhető meg. Az alacsonyabb értékeket valószínűleg a fémek részéről történő visszaverődés (korábban már említett zavaró hatása okozza), míg a legmagasabb hőmérsékleteket a működő klíma berendezés melegedése eredményezheti. A nagy felületű tető átlagos hőmérséklete 18°C körüli volt. A körüttől északra főként lapos tetővel rendelkező panelházakat és azokat körülölelő zöldterületek láthatunk. Az épületek átlagos hőmérséklete 27°C-nak adódott. Feltűnő különbség mutatkozik a különböző zöldterületek között: a füves parkok és a labdarúgópálya (a terület déli részén) hűvösebbek (23–25°C), helyenként még a locsolás nyoma is megfigyelhető bennük, míg a kép keleti oldalán látható erdős terület átlagosan 28°C hőmérsékletű. A déli részen sűrűbb beépítésű, családi-, társasházak terület található. Ezek között jóval kevesebb (hűtő hatással is bíró) zöldfelület figyelhető meg, ami magyarázhatja a panelházak övezeténél magasabb (27°C) hőmérsékleteket (RAKONCZAI ET AL., 2009).

Újszegedi lakótelep és kiskertes övezet (Füvészkert és környéke)

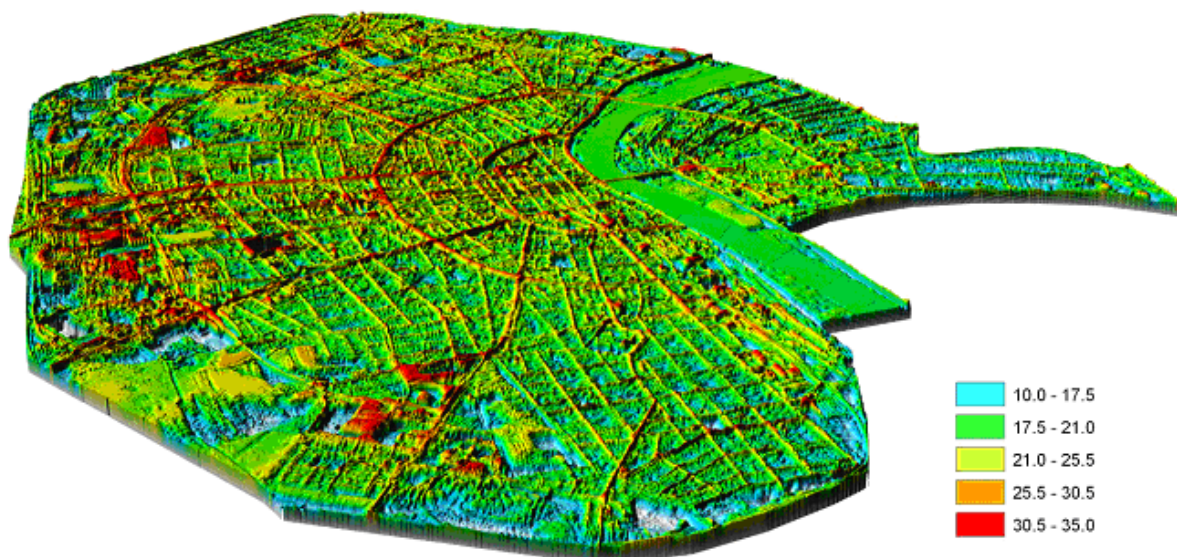
A következő térkép az újszegedi Füvészkertet és annak – főként kiskertes beépítésű – környezetét fedi le (19/D melléklet). A kép ÉNy-i sarkába a Tisza egységes hőmérsékletű – mindössze 2°C szórás mellett átlagosan 23,4°C-os – felszíne nyúlik be. A hullámtéri erdő 27–29°C-os, így jól elkülönül a töltés hűvösebb, 20–22°C-os füves oldalától. A terület ÉK-i része az Odessza városrész panelházak övezetét, a sportcsarnokot és uszodát, illetve a forgalmas 43-as út környékét ábrázolja. Mérhető a nyitott medence 27–28°C-os vízfelülete, ami mellett élesen kirajzolódik a fém tetőborítású csarnok (16–18°C). Ahogy a város más részein, itt is az aszfaltozott útfelületek és parkolók melegedtek fel a legintenzívebben. A vasúti pálya ívétől délre már főként kiskertek és mezőgazdasági területek találhatók. Ezek alacsonyabb hőmérsékletét csak az erdőfoltok és az úthálózat töri meg néhol. A műveléstől függően 15–23°C között szóródnak az értékek a mezőgazdasági parcellákon. A Füvészkert egészére számított átlaghőmérséklet 23–24°C, ami a hűvösebb - valószínűleg locsolt - füves területek, és a kicsivel melegebb fás részek eredőjeként adódik. Összességében elmondható, hogy a

városközponttól nem túl messze - attól a Tisza által elválasztva - már olyan, nagyobb kiterjedésű területek találhatók, melyek a belváros 27–28°C-os felszíneivel ellentétben helyenként mindössze 20–22°C-osak (RAKONCZAI ET AL., 2009).

Családi- és társasházak övezet (Móraváros)

Móraváros családi- és társasházak övezetét mutatja be a 19/E melléklet. A felvétel DK-i sarkában a Petőfi S. sgt. és a Moszkvai krt. kereszteződése, míg a É-ÉNy-i sarokban a Kálvária sgt. melegebb, 30–32°C hőmérsékletű aszfalt borítású felszínei láthatók. A területet az 1879-es árvíz után kialakított utcahálózat, és az azok által lehatárolt tömbökön belül változó telekméret jellemzi. A körúthoz közelebb nagyobb tömböket alakítottak ki, így ott van lehetőség nagyobb hátsókert, növényzettel fedett udvar kialakítására. Ezek rendszerint hűvösebbek (19–20°C) mint a mesterséges anyagokkal borított burkolt felszínek (23–25°C). A körüttől távolodva (a kép Ny-i részén) már sűrűbb és egymásra merőleges utcahálózatot alakítottak ki, így a hátsó udvaroknak sokkal kisebb hely jutott, illetve a társasházak beépítés miatt ezeket a hátsó udvarokat a garázsok, esetleg egy újabb lakóépület foglalja el. Ezeken a tömbökön belül a hőmérséklet 22–26°C között változik és hiányzik a hidegebb légtömeget előállító zöldfelület is (RAKONCZAI ET AL., 2009).

A hőmérsékleti értékekből előállított háromdimenziós térképen (5.39. ábra) jól látható, hogy az úthálózat fő elemei magasabb hőmérsékletükkel látványosan elkülönülnek környezetükből. Ugyancsak látványosan kiemelkednek - 30°C feletti értékeikkel - a sűrű beépítésű lakóterületek a kevesebb zöldfelület, a bevásárló központok a nagy kiterjedésű parkolóik, illetve az iparterületek nagy kiterjedésű burkolt felületeik miatt. A nyári kánikulában komfortosabb környezetet a fában gazdagabb, illetve kertvárosias beépítésű területek biztosítanak.



5.39. ÁBRA A felszín hőmérsékleti értékei alapján előállított háromdimenziós térkép Szeged körtőlésen belüli területéről (2008. augusztus 14.)

Annak ellenére, hogy a fenti elemzések csak egy-egy kiragadott nap adatai alapján készültek, a következtetések általánosíthatók: a példákban említettekhez hasonló struktúrájú városrészek felszínének nyári esti hőmérsékleti viszonyai a városklíma kutatások fontos alapját képezhetik.

6. KITEKINTÉS – ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK

A kutatásom során gyűjtött és feldolgozott távérzékelte felvételek és az azokból változatos műveletsorok eredményeként levezetett térképek végső soron a döntéshozási és végrehajtási szinteken kerülnek felhasználásra. A városüzemeltetés mellett fontos alkalmazási területként jelennek meg a különböző környezet- és földtudományok.

A következőkben röviden áttekintem az adatok és a származtatott állományok városi és városkörnyéki alkalmazásának főbb irányvonalait.

CIR és infravörös felvételek (MS3100, Trimble AIC)

Az alkalmazott kamerák kiépítésükből adódóan (4.2.1. fejezet) viszonylag mobilisak, alacsony üzemeltetési költségek mellett, a felhasználói igényekhez igazodva operatív adatgyűjtést tesznek lehetővé (TOBAK ET AL., 2008A).

A színes-infravörös felvételeken a spektrum látható tartományán túl a közeli-infravörös sugárzás is rögzíthető. Ennek előnyeit elsősorban a – jellegzetes reflektancia görbével rendelkező – növényzet és a napsugárzást itt már szinte teljesen elnyelő vízfelületek térképezésében tudjuk kihasználni. A vegetációs indexekre alapuló, hosszú távú monitoring vizsgálatokat a pontos radiometriai és atmoszférikus kalibráció hiánya akadályozhatja. Ugyanakkor a városi parkok fásszáru és gyeppel borított területei a felvételek alapján automatikusan is jól elkülöníthető (5.5.2. fejezet). A hiperspektrális adatoknál kisebb költségek mellett alkalmasak lehetnek a növényzet egészségi állapotának monitorozására és főbb típusok szerinti elkülönítésére. A mesterséges, vízzáró felszínek és a zöldterületek egymástól – akár automatikus eljárásokkal is – eredményesen elkülöníthetők, ami lehetővé teszi a beépítési és zöldfelületi arányok gyors számítását. A vízfelületek azonosítására korábbi – mezőgazdasági területen végzett – kutatások szolgálnak például. Ezek keretében került sor a környezetvédelmi engedélyekhez kötött objektumok (fóliasátrak, üvegházak, vízkivételi helyek és víztározók) térképezésére és ellenőrzésére (20/A melléklet) (VAN LEEUWEN ET AL., 2009B, KITKA ET AL., 2010). Részben CIR felvételek alapján sikeres kísérletek történtek a belvizek elöntése alatt lévő területek lehatárolására is, melyhez különböző osztályozási eljárásokkal alkalmaztunk (20/B melléklet) (VAN LEEUWEN ET AL., 2010, 2012B; SZATMÁRI ET AL., 2011).

A kisgépes felvételezés során a repülési magasság – az igényelt geometriai felbontásnak megfelelően – rugalmasan alakítható. Alacsony magasságból, néhány cm-es pixel mérettel dolgozva a spektrális információ tartalomhoz nagy mennyiségű geometria információ is társul. Ezzel lehetővé válik például a nagyméretarányú, akár telek szintű beépítési arányok számítása, az illegális építkezések, hulladéklerakók pontos lehatárolása is.

TIR felvételek

A hőkamerás felvételek szintén széleskörű felhasználást tesznek lehetővé. A kalibrált felszínhőmérséklet adatok alapján – tapasztalati egyenletek alkalmazásával – számítható az adott felszín feletti légréteg hőmérséklete (UNGER ET AL., 2010B). Az összetett geometriával rendelkező városi környezetben a különböző hőmérsékletű légtömegek mozgása, kicserélődése izgalmas kutatási terület. Ehhez szolgáltat alapadatot a felmelegedés gócpontjainak (pl. nagyterjedésű parkolók) és a – párologtatás révén – hűtő hatással bíró növényzet és vízfelületek térképezése (5.8.3. fejezet). A város minél jobb átszellőzésének, légcseréjének biztosítása érdekében a várostervezési folyamatokban, az építési engedélyek kiadásakor ezeket az információkat mindenképpen figyelembe kell venni.

A felszínborítás, a beépítési típusok, az aktuális meteorológiai helyzet és a mért léghőmérsékletek közötti kapcsolatok vizsgálata képezi a városi hősziget kutatások tárgyát. A terepi léghőmérséklet mérések mellett a felszínhőmérsékletek távérzékeléses detektálásával

meggyorsítható, nagyobb területen és több időpontban is hatékonyabbá tehető az adatgyűjtés (UNGER ET AL., 2009, 2010A.).

A lakótelepek 20-30 éves panel blokkjainak felújítására 2004-2008 között Szegeden jelentős város rehabilitációs program zajlott. Ennek keretében a nyílászáró cserék mellett födém- és homlokzatszigetelést is végeztek. A hagyományos, terepi hőkamerás ellenőrzéseket repülőgépről történő felvételezés is kiegészítette. Az összehasonlító elemzések egyértelműen kimutatták a felújítások következtében hatékonyabbá váló energiagazdálkodást: a nyári felvételek alapján a szigetelt épületek kevésbé melegedtek fel, mint társaik (20/C melléklet) (SZATMÁRI ET AL., 2010, NÉMETH, 2010). Téli időszakban végzett repülésekkel a fűtési szezonban jelentkező megtakarítás – a kevesebb „elszökő” hőmennyiség – is jól térképezhető lenne.

A hőkamerás felvételek felhasználásának határt szab az alkalmazott – kézi – kamera alacsony felbontása (320x240 pixel), ami a nagy méretarányú vizsgálódást csak kisebb területeken teszi lehetővé; illetve a pontos geometriai kalibráció hiánya, ami a felvételek térbeli tájékozását nehezíti meg (4.2.1. fejezet).

RGB felvételek

Adott magasságból a legnagyobb térbeli felbontású felvételek a Trimble kamerával készíthetők. Ennek megfelelően a lehetséges alkalmazási körök ismertetésénél elsősorban a nagyméretarányú térképezés különféle eseteit kell számba venni. Mivel csak a látható– illetve szűrő segítségével a közeli infravörös – színtartományban képes a rendszer felvételeket készíteni, ez esetben nagy spektrális információtartalommal nem számolhatunk.

A városüzemeltetés fontos feladata a város tulajdonában lévő, közterületeken található ingóságok (pl. utcabútor, szemetes) pontos leltározása. Megfelelően nagy térbeli felbontás mellett ezeknek nem csak a pozíciója, de akár típusa és állapota is térképezhető légifelvételekről. Hasonló a helyzet a közmű szolgáltatók felszíni objektumaival is. A zöldterületek kezelése során a területek pontos meghatározása (pl. fűnyírás) vagy fakataszter készítése (és/vagy aktualizálása) merülhet fel feladatként. A fafajok elkülönítésében további hasznos információkkal szolgálhatnak az infravörös felvételek. A felsorolt példákban a helyzeti és geometriai pontosság kap nagyobb hangsúlyt.

A képkészítő felvételezések egyik előnyös tulajdonsága, hogy az átfedéssel készített, szomszédos képek alapján magassági információk levezetésére van lehetőség (5.3. fejezet). Mindez – társítva a nagy geometriai részletességgel – lehetővé teszi, hogy akár épület alatti léptékben modellezzük egy háztömb vagy városrész 3 dimenziós viszonyait. A 3D városmodellek felhasználása egyre szélesebb körű. A legegyszerűbb – bár vizuálisan a legnagyobb igényeket támasztó – turisztikai bemutató alkalmazások vagy az utcaképek jelenlegi és jövőbeli modellezése mellett a térbeli számításokon alapuló feladatok - láthatósági és árnyékolás/besugárzás vizsgálatok - is alapadatként használják fel az elkészült felületmodelleket (20/D melléklet) (FRANK, 2013). A nagyobb adatsűrűséget biztosító légi és terepi lézeres felmérések kiegészítésére – pl. a jellegzetes törésvonalak 3D digitalizálásával – városi és mezőgazdasági területeken egyaránt alkalmazhatók (SZATMÁRI ET AL., 2011).

Hiperspektrális felvételek

A hiperspektrális adatok felhasználási területeinek bemutatásakor elsősorban a hatalmas spektrális információtartalomban rejlő lehetőségeket kell figyelembe venni. A változatosan használt városi térszínek mozaikos felszínborítása mögött anyagi sokszínűség áll. Ennek a térképezése néhány – átlagolással tovább generalizált vagy nem megfelelően pozicionált – felvételi sáv esetén nagy pontossággal nem megvalósítható. A hiperspektrális felvételek osztályozásából részletes, sok-kategóriás, felszínborítási információk származtathatók (5.3-5.6. fejezetek). Ezeket a térképeket – több idősíki összevetésével – monitoring vizsgálatokra,

állapot- és kárfelmérésre (pl. útburkolatok és tetőborítások esetében) is felhasználhatjuk. Az alkalmazások széles körét mutattam be az irodalmi áttekintésben (2.3. fejezet).

Városainkban egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a zöldterületek és az általuk nyújtott ökológiai szolgáltatások (*ecosystem services*), melyek kutatásának értékes alapadatai lehetnek ezek a felvételek. Az ún. keskeny sávú vegetációs indexek nagy számban állnak rendelkezésünkre (TAMÁS ET AL., 2010). Segítségükkel nemcsak a fás- és lágyszárú növényzet típusai különíthetők el nagy pontossággal (pl. allergizáló vagy özönnövények (CSENDES, 2012)), de az egészségi állapot is jól monitorozható, a különféle betegségek megjelenése pedig térképezhető.

A felsorolt néhány alkalmazási példa és lehetőség után mindenképpen meg kell említeni, hogy a légi távérzékeléssel nyert felvételek előállítása és feldolgozása mellett talán ugyanolyan fontos a megfelelő felhasználói kör felkutatása. Sok esetben – és ez egyaránt igaz a városüzemeltetésben dolgozókra, illetve a különféle tudományterületek képviselőire is – nem ismertek pontosan a távérzékelte felvételek alkalmazásában rejlő lehetőségek, illetve korlátok. Ezek bemutatása, tudatosítása fontos feladata a technológiát ismerő és használó szakembereknek.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt évtizedben – az urbanizációs és városfejlesztési folyamatok hatására - Szeged város – hasonlóan hazánk több nagyvárosához - jelentős fejlődésen ment keresztül. Ez a folyamat a beépítés jellegében, a felszínborítások és a különböző területek funkcióinak változásában érhető leginkább tetten. A korábban 5 évente készült országos légifelvételési kampányok adatai időbeli, spektrális és térbeli felbontásukban sem voltak alkalmasak a gyors változások pontos nyomon követésére. Az ezredfordulón hazánkban is elterjedő modern légi felvételző technológiák hatására a rendelkezésre álló adathalmaz mind mennyiségében, mind minőségében jelentősen kibővült. Az adatgyűjtés mellett fontos megemlíteni az adatfeldolgozási módszerek fejlődését, illetve a megfelelő hardver, szoftver és humán erőforrások jelenlétét is.

Kutatásom során különböző spektrális és térbeli felbontású, légi távérzékeléssel nyert adatokkal dolgoztam. A felvételek egy része saját kisgépes felvételző rendszerrel készült, melynek felépítéséről és működéséről részletes leírást adtam. A 3-4 üléses kisrepülőgépre 3 különböző típusú kamerát sikerült telepíteni, megoldva a repülési terv készítés, az energiaellátás, a navigáció és az adattárolás feladatait is. A színes-infravörös (CIR) és termális infravörös (TIR) kamerák felvételeinek durva geometriai korrekcióját – a navigációs adatokat felhasználva - saját ArcView és ArcGIS scriptekkel végeztem el. Elkészült a Szeged város teljes – Körtöltésen belüli - területét lefedő 50 cm-es CIR és 2,5 m-es TIR felvételzés és mozaik. A Trimble légifelvételző rendszerrel 10 cm térbeli felbontású valós színes adatokat gyűjtöttünk a városról. A kisgépes, kisformátumú felvételezéseket a tradicionális légi felvételző kampányokkal összevetve megállapítható, hogy előbbiek felhasználása elsősorban operativitásuk és rugalmas konfigurálhatóságuk miatt terjed egyre jobban. Nem szabad azonban elfelejtenünk – a jelenleg alkalmazott feldolgozási módszertan mellett jelentkező - hátrányaikról, mint amilyen az egzakt georeferencia vagy a CIR képek esetében a radiometriai korrekció hiánya.

Az előfeldolgozáson korábban átesett AISA Dual hiperspektrális adatok esetében – a radiometria, geometriai és atmoszférikus kalibráció elméleti szintű bemutatása mellett - az adathalmaz optimalizációjának lehetőséget vizsgáltam részletesen, melynek keretében térbeli és spektrális dimenziócsökkentést hajtottam végre. Előbbit mintaterületek kijelölésével, utóbbit 119 zajos sáv manuális kiszűrésével, illetve a PCA és MNF transzformációkkal végeztem el.

Kutatási mintaterületeim kijelölésekor arra törekedtem, hogy azok beépítési jellegükkel és az előforduló felszínborítási típusaikkal egyaránt jól reprezentálják Szeged város egészét, illetve általánosságban a hazánkban előforduló városi beépítés és felszíntípusokat. Az alsóvárosi területen a kertes családi házak és viszonylag szűk utcák, a belvárosban a sűrű és magas beépítés mellett a széles utak, Tarjánban pedig a lakótelepek panel épületei és a közöttük elterülő, kiterjedt zöldfelületek jellemzőek.

Az osztályozások ellenőrzéséhez felhasználható terepi referencia térképek előállításának támogatására Digiterra Explorer alapú adatgyűjtési metódust dolgoztam ki, ami az irodai előkészítő fázisok mellett pontosan szabályozza a terepi munkát, kihangsúlyozva a térképezés jellegzetes hibáit (pl. épületek kidőlése, kitakarás).

A felszínborítási térképek előállítását megelőzően a hiperspektrális adathalmaz – azaz képi információk - alapján 22 elemű spektrumkönyvtárt hoztam létre. A spektrális szögeltérések mérésével vizsgáltam az egyes elemek (tanuló pixel halmazok) belső homogenitását. Ennek eredményeképpen pontosan (pl. füves és fás vegetáció) és rosszul (pl. szürke cseréptetők) definiált osztályokat különíthettem el. A térképezendő felszínborítási kategóriák egymáshoz viszonyított szeparabilitását a spektrális szögeltéréssel és a spektrális térben mért Jeffries-Matusita távolsággal jellemeztem. Ez alapján a problémás osztályok a különböző színű (piros, lila, szürke) cseréptetők, illetve az aszfalt, beton és bazalt burkolatok

lettek. A spektrumkönyvtár összeállítását követően részletesen bemutattam – és más forrásokkal összevettem – a későbbi osztályozásokban felhasznált referencia spektrumokat.

Céljaim között szerepelt az adathalmazok térbeli és spektrális információtartalmának önálló majd integrált értékelése és osztályozási célú felhasználása. Az eredmények alapján elmondható, hogy a bázisirányú átfedéssel készített, nagy térbeli felbontási felvételekből kinyert szegmensek és magassági információk – megfelelő feltételrendszer kialakításával - már 3 spektrális sáv mellett is alkalmasak a városi felszínborítás nagy méretarányú térképezésére. A tulajdonságtér dimenziójának emelésével az osztályozások pontossága tovább növelhető. Fontos hangsúlyozni ugyanakkor, hogy a szegmentálási paraméterek és az alkalmazott küszöbértékek megállapítása tapasztalati úton történt, így a módszer más területeken csak megfelelő adaptációt követően használható fel.

Szigorúan csak spektrális információkon alapuló felszínborítás térképezés CIR és hiperspektrális adatok alapján végezhető csak eredményesen. Az automatikus (ISODATA) és irányított (Minimum Distance, Maximum Likelihood és Spectral Angle Mapper) eljárások közül utóbbiakkal legfeljebb 21 különböző kategóriát különítettem el. A színes-infravörös adatok alapján – mintaterületenként és algoritmusonként eltérő mértékű – 70-80% közötti teljes pontosságot sikerült elérni. A hiperspektrális adatok esetében Maximum Likelihood klasszifikáció 85% feletti teljes pontosságot szolgáltatott. Az automatikus eljárások elsősorban a növényzet azonosításában voltak eredményesek. Problémaként leggyakrabban a spektrálisan hasonló útburkolatok és tetőborítások félreosztályozása jelentkezett, amit a magassági információkat felhasználó küszöbölési eljárással sikerült jelentősen mérsékelni.

A különböző osztályozási eljárások tesztelésekor – a képelemek hibás besorolására adott magyarázatok mellett - az eredménytérképek alapján az egyes mintaterületek felszínborítását részletesen elemeztem. A felszínborítások egyes területeken számított arányai – és a kapcsolódó térképezési problémák - jellemzőek lehetnek más, hasonló struktúrájú városrészekre. Az osztályozások eredményeképpen a kiválasztott mintaterületek részletes – nagy méretarányú és sok-kategóriás – felszínborítási térképei jöttek létre, melyek kiindulási alapjául szolgálhatnak a városi területhasználat és beépítettség térképeknek. A teljes városra történő térbeli kiterjesztés lehetőségeit vizsgálva elsősorban az adathiány, a CIR felvételek radiometriai heterogenitása és a számítási kapacitás jelentkeztek korlátozó tényezőként.

Főbb felszínborítási kategóriáinként vizsgálva megállapítható, hogy a füves és fás vegetáció esetében az MNF transzformált hiperspektrális adatok Maximum Likelihood klasszifikációja, a panel és egyéb speciális (pala, fém, műanyag) tetőknél az előzőhöz hasonlóan osztályozott, de korábban PCA transzformált adathalmaz szolgáltatja a legjobb eredményeket. A különböző színű cserép tetőborítások szegmensek felhasználásával különíthetők el leghatékonyabban. A képi objektumok címkézéséhez az RGB felvételek 3 csatornája mellett a magassági információkat tartalmazó felületmodellre és az MNF transzformált AISA Dual adatokra is szükség volt.

A hőkamerás felvételezés adatainak felhasználásával kísérletet tettem 4 fő kategória (talaj-vegetáció-épület-útburkolat) elkülönítésére. Ezek térbeli mintázata azonban csak a környezeténél jobban felmelegedő úthálózatot rajzolja ki pontosan, az épületek és zöldfelületek ezzel a módszerrel egyértelműen nem különíthetők el egymástól. A két felvételezési időpont felszínhőmérsékleti térképeinek általános jellemzése mellett 5 jellegzetes beépítésű területen részletesebben is elemeztem a felszínhőmérséklet és az azt befolyásoló tényezők – elsősorban a felszínborítás – kapcsolatát.

Dolgozatom végén – mintegy ki- és jövőbe tekintésként – sorra vettem a felhasznált adatforrások és az azokból levezetett térképek néhány már megvalósult, illetve lehetséges jövőbeli alkalmazási területét. A szűkebb értelemben vett városi környezet mellett foglalkoztam a közvetlen városkörnyéki, városellátó mezőgazdasági térségekkel is. Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy a CIR felvételek sikeresen bevonhatók a vízrendezéssel kapcsolatos (pl. belvíz térképezési) vizsgálatokba, a légi távérzékelte felszínhőmérséklet adatokat pedig a városklíma kutatásokban alkalmazzák előszeretettel. A nagy térbeli

felbontású ortofotó térképek a városüzemeltetés és a közmű szolgáltatók eszköztárát gazdagítják, míg a hiperspektrális felvételek – a jelen kutatásban is bemutatott részletes felszínborítás térképezés helyett - jelenleg leginkább a városi zöldfelület monitoring feladatokban találnak felhasználókra.

Munkám során a kisformátumú és a hiperspektrális adathalmazok előállítása és feldolgozása közben számos problémával, kihívással szembesültem, melyek egy részére sikerült megoldást találnom. A jövőbeli felvételezések tervezésekor, az újonnan nyert tapasztalatok alapján egy részük már kiküszöbölhetővé válhat. Az árnyékhatások csökkentése érdekében mindenképpen törekedni kell a tiszta időben és magas napállás mellett végrehajtott repülésekre. A lombkorona okozta kitakarást a vegetációs időszakon kívüli felvételezéssel részben csökkenthetjük. A magas épületek „kidőlése” és kitakarása több nézőpontból készített felvételekkel – bonyolultabb adatfeldolgozási eljárások mellett - orvosolható. A képkészítéssel egy időben – vagy ahhoz időben a lehető legközelebb – végzett terepi mintagyűjtés nemcsak az atmoszférikus hatások kiszűrését segítheti elő, de referencia adattal szolgálhat az osztályozások ellenőrzésekor is. A kisformátumú felvételek pontosabb és gyorsabb georeferálását – a költségtényező jelentős növekedése mellett – inerciális rendszer (INS) alkalmazása tenné lehetővé. A vizsgált felszínborítási kategóriák kijelölése során különös figyelmet kell szentelni azok megfelelő mértékű spektrális szeparabilitásának. Ebben a különböző endmember kijelölő eljárások is segítségünkre lehetnek. A hagyományos – multispektrális adatokra fejlesztett – osztályozó algoritmusok mellett mindenképpen érdemes lenne további speciális eljárások tesztelése is. Mivel figyelmem nem kizárólagosan a városi zöldfelületekre irányult, a hiperspektrális adatok keskeny csatornáinak előnyét kihasználó keskenysávú indexekkel sem foglalkoztam. Az objektum alapú eljárásoknál további vizsgálatok tárgyát képezheti a szegmentálási paraméterek optimalizálása, az alkalmazott küszöbértékek finomhangolása, illetve a spektrális és magassági tulajdonságok mellett komplexebb alaki és térbeli kapcsolódási jellemzők bevonása az osztályozásba.

Jól látható, hogy az adatgyűjtés, az adatfeldolgozás és az alkalmazások területén is vannak még kihasználatlan lehetőségek. A rohamos technológiai és módszertani fejlődéssel, illetve a felhasználói igényekkel lépést kell tartani. Az elmúlt években sorra jelentek meg az egyre kompaktabb – így akár pilóta nélküli (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) eszközre is telepíthető -, tudásokban mégsem korlátozott felvételező eszközök. A korábban önálló adatgyűjtések helyét pedig átveszik a komplex - lézeres magassági (LiDAR), nagyfelbontású színes és/vagy színes-infravörös, illetve hiperspektrális adatokat egy időben előállítani képes - szimultán felvételezések. Az adatok előállítása és az eredményes interpretáció közötti időtartam fokozatosan lerövidül, lehetővé téve a – közel – valós idejű döntéstámogatást és felhasználást.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, *Dr. Mucsi Lászlónak*, aki a PhD témaválasztástól kezdődően segítségemre volt hasznos észrevételeivel és tanácsaival. Tudományos kapcsolatai révén nemcsak az adatok beszerzését, de a felvételező rendszer kiépítését is nagyban megkönnyítette számomra. Az egyetemi képzés alatt általa oktatott távérzékelési kurzusok megfelelő alapot biztosítottak a disszertáció képfeldolgozási és kiértékelési részeihez.

Külön köszönet illeti *Dr. Mezősi Gábort*, akinek tanszékvezetése alatt nyugodt légkörben végezhettem kutatásaimat. Hálával tartozok neki dolgozatom többszöri átolvasásáért, folyamatos ösztönzéséért és építő kritikáiért.

Kollégáim, az *SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszékének* dolgozói közül elsősorban szobatársamnak, *Dr. Boudewijn van Leeuwen-nek* tartozom köszönettel, akitől a kutatásom majd minden részében kérhettem segítséget, és aki nemcsak az irodában, de sokszor a felvételezések során is mellettem volt. Külön köszönöm a programozási részekben és az angol fordításokban nyújtott pótolhatatlan segítségét!

Köszönet illeti *Dr. Szatmári Józsefet*, hogy még hallgató koromban megszerettette velem a légifelvételezés csodálatos világát, majd együtt kezdtük el a saját felvételező rendszer fejlesztését. Tanácsaival mindvégig segítette munkámat.

Köszönetet mondok *Fiala Károlynak*, az ATIVIZIG munkatársának, aki a hőkamerás felvételezésben és adatfeldolgozásban volt segítségemre, illetve *Szűjj Nándornak* a Trimble kamera telepítésében és beüzemelésében nyújtott segítségéért.

Hálával tartozom *szüleimnek*, akik mindenkor biztos háttérrel nyújtottak számomra. Köszönöm *feleségemnek*, hogy a PhD tanulmányaimmal és kutatásommal éppen egyidős kapcsolatunk során mindig mellettem állt és türelmével, szeretetével folyamatosan támogatott.

IRODALOMJEGYZÉK

- Abd-Elrahman, A., Pearlstine, L., Dewitt, B.A., Smith, S.E. (2001): Detection of positional errors in systems utilizing small-format digital aerial imagery and navigation sensors using area-based matching techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **67**, pp. 825-831.
- Aber, J.S., Marzloff I., Ries, J.B (2010): Small-Format Aerial Photography. Elsevier, ISBN: 978-0-444-53260-2
- Abrams, M.J., Alberotanza, L., Cavalli, R.M., Cuomo, V., Pignatti, S., Tramutoli, V. (2001): Airborne and satellite hyperspectral data over the Venice test site. *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, Issue 474, pp. 446-450.
- Abrams, M.J., Ashley, R.P., Rowan, L.C., Goetz, A.F.H., Kahle, A.B. (1977): Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 μ m. *Geology*, **5**, pp. 713-718.
- Bácsatyai, L., Márkus, I. (1992): *Fotogrammetria és távérzékelés*. Egyetemi jegyzet. Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron
- Bakó, G. (2010): Igen nagyfelbontású légifelvétel-mozaikok készítése kis- és középformátumú digitális fényképezőgépekkel. *Geodézia és Kartográfia*, **62**, pp. 21-29.
- Bakos, K. (2008): Hyperspectral data interpretation and image processing chain development perspectives for vegetation studies. *Hungarian Journal of Landscape ecology*
- Baldrige, A.M., Hook, S.J., Grove, C.I., Rivera, G. (2009): The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, **113**, pp. 711-715
- Barducci, A., Benvenuti, M., Bonora, L., Castagnoli, F., Guzzi, D., Marcoionni, P., Pippi, I. (2006): Hyperspectral remote sensing for light pollution monitoring. *Annals of Geophysics*, **49**, pp. 305-310.
- Barducci, A., Marcoionni, P., Pippi, I., Poggesi, M. (2003): Effects of light pollution revealed during a nocturnal aerial survey by two hyperspectral imagers. *Applied Optics*, **42**, pp. 4349-4361.
- Bärring, L., Mattsson, J.O., Lindqvist, S. (1985): Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden. *Journal of Climatology*, **5**, pp. 433-444.
- Basedow, R.W., Zalewski, E. (1995): Characteristics of the HYDICE sensor, *AVIRIS Proceedings*, Vol. 95, 9 p.
- Bassani, C., Cavalli, R.M., Cavalcante, F., Cuomo, V., Palombo, A., Pascucci, S., Pignatti, S. (2007): Deterioration status of asbestos-cement roofing sheets assessed by analyzing hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, **109**, pp. 361-378.
- Ben-Dor, E., Lugassi, R., Richter, R., Saaroni, H., Muller, A. (2001): Quantitative approach for monitoring the urban heat island effects, using hyperspectral remote sensing. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 6, pp. 2541-2546.
- Ben-Dor, E., Saaroni, H. (1997): Airborne video thermal radiometry as a tool for monitoring microscale structures of the urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, **18**, pp. 3039-3053.
- Benediktsson, J.A., Chanussot, J., Fauvel, M. (2007): Multiple classifier systems in remote sensing: from basics to recent developments. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4472 LNCS, pp. 501-512.
- Benediktsson, J.A., Palmason, J.A., Sveinsson, J.R. (2005): Classification of hyperspectral data from urban areas based on extended morphological profiles. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **43**, pp. 480-491.
- Benediktsson, J.A., Palmason, J.A., Sveinsson, J.R., Chanussot, J. (2004): Decision level fusion in classification of hyperspectral data from urban areas. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 1, pp. 73-76.
- Benediktsson, J.A., Pesaresi, M., Arnason, K. (2003): Classification and feature extraction for remote sensing images from urban areas based on morphological transformations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, pp. 1940-1949.
- Berke, J., Bíró, T., Burai, P., Hoffman, I., Józsa, J., Kováts, L.D., Kozma-Bognár, V., Nagy, T., Németh, T., Tomor, T., Tóth, F. (2011): A vörösiszap katasztrófa telemetriai adatfeldolgozásának eredményei. *Informatika a felsőoktatásban*. Debrecen, 2011. augusztus 24-26. pp. 849-854, ISBN 978-963-473-461-1.
- Bhaskar, S., Datt, B. (2000): Sub-pixel analysis of urban surface materials. A case study of Perth, W. Australia. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 4, pp. 1535-1537.
- Bhaskaran, S., Datt, B., Forster, B., Neal, T., Brown, M. (2004): Integrating imaging spectroscopy (445-2543 nm) and geographic information systems for post-disaster management: A case of hailstorm damage in Sydney. *International Journal of Remote Sensing*, **25**, pp. 2625-2639.
- Bhaskaran, S., Forster, B., Datt, B., Neal, T. (2001): Hail storm vulnerability assessment by using hyperspectral remote sensing and GIS techniques. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 4, pp. 1826-1828.

- Bianchi, R., Cavalli, R.M., Fiumi, L., Marino, C.M., Panunzi, S., Pignatti, S. (1996): Application of airborne remote sensing for metropolitan area mapping: Examples applied to the historical center of Rome. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 2960, pp. 220-224.
- Boardman, J.W. (1993): Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. *Summaries of the Fourth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, Washington, D.C., pp. 11-14.
- Boardman, J.W., Kruse, F.A. (1994): Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: *Proceedings, ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. I-407 - I-418.
- Bochow, M., Segl, K., Kaufmann, H. (2008): Comparison of multi-and hyperspectral remote sensing data for use in comprehensive urban biotope mapping. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 5
- Bokoye, A.I., Dionne, P. (2004): Urban material characterization from the Hyperion hyperspectral imager: Application to downtown Montreal (Quebec, Canada). *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 5238, pp. 569-574.
- Borghys, D., Shimon, M., Perneel, C. (2007): Change detection in urban scenes by fusion of SAR and hyperspectral data. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 6749
- Bryan, L.M. (1975): Interpretation of an urban scene using multi-channel radar imagery. *Remote Sensing of Environment*, **4**, pp. 49-66.
- Burai, P. (2006): Földhasználat-elemzés és növény-monitoring különböző adattartalmú és térbeli felbontású távérzékelési felvételek alapján, *Acta Agraria Debreceniensis*, Debreceni Egyetem. 2006/22, pp. 7-12.
- Burai, P., Kovács, E., Lénárt, Cs., Nagy, A., Nagy, I. (2009): Quantification of vegetation stress based on hyperspectral image processing. *Cereal Research Communications*, Akadémiai Kiadó, Budapest, Vol. 37, pp. 581-584. Paper ISSN 0133-3720, Online ISSN 1788-9170.
- Burai, P., Lénárt, Cs., Biró, T. (2008a): Spectral characterization and mapping of sugar beet disease. *Cereal Research Communications*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 36, pp. 811-814. Paper ISSN 0133-3720, Online ISSN 1788-9170.
- Burai, P., Lénárt, Cs., Kovács, E., Nagy, A., Tamás, J. (2008b): Hiperspektrális légi távérzékelési adatok és laboratóriumi spektrofotometriás klorofilltartalom összefüggésvizsgálata. *VIII. Magyar Biometriai és Biomatematikai Konferencia*. Budapest, 2008. július 1-2.
- Burai, P., Nagy, A., Lénárt, Cs., Tamás, J. (2009): Parlagfű (*Ambrosia artemisiifolia*) - térképezés AISA hiperspektrális felvételek alkalmazásával. *V. Erdei Ferenc Tudományos Konferencia*, Kecskemét, Magyarország, 2009. szeptember 3-4. ISBN:978-963-7294-73-0.
- Burai, P., Pechmann, I. (2004): Különböző spektrális felbontású távérzékelési adatforrások alkalmazási lehetőségei az agrár-környezetvédelemben. *Agrárközlemények, Acta Agraria Debreceniensis*, Debreceni Egyetem. 2004/13, pp. 123-126.
- Cavalli, R.M., Fusilli, L., Pascucci, S., Pignatti, S., Santini, F. (2008): Hyperspectral sensor data capability for retrieving complex urban land cover in comparison with multispectral data: Venice city case study (Italy). *Sensors*, **8**, pp. 3299-3320.
- Chen, S.E., Rice, C., Boyle, C., Hauser, E., Philbrick, B. (2010): Small-format fly-over photography for highway bridge monitoring. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 7647
- Colwell, R.N. (1997): History and place of photographic interpretation. In: Philipson, W.R. (Ed.): *Manual of photographic interpretation*. 2nd edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, United States, pp. 3-47. ISBN: 9781570830396
- Congalton R.G., (1991): A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote sensing of the Environment*, **37**, pp. 35-46.
- Connors, R.W., Trivedi, M.M., Harlow, C.A. (1984): Segmentation of a high-resolution urban scene using texture operators (Sunnyvale, California). *Computer Vision, Graphics, & Image Processing*, **25**, pp. 273-310.
- Csendes, B. (2012): Detection of invasive plants on the flood plain of river Tisza, using hyperspectral airborne imagery. In: Geomathematics as geoscience - Conference, Opatija, Croatia, 2012.05.23-25., Croatian Geological Society, pp. 187-194. ISBN:978-953-95130-6-9
- Dare, P.M. (2005): Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **71**, pp. 169-177.
- Davis, J.C. (1986): *Statistics and Data Analysis in Geology*, John Wiley & Sons, New York, 550 p.
- De Bruijn, C.A. (1984): MASMAP, design for a project-oriented geo- information program package for urban upgrading schemes. *ITC Journal*, **2**, pp. 95-103.
- Deákvári, J., Kovács, L. (2007): AISA hiperspektrális távérzékelési rendszer ismertetése. http://www.fvmmi.hu/file/document/kut/800_aisa_leiras.pdf

- Decker, A.G., Malthus, T.J., Wijnen, M.M., Seyhan, E. (1992): The effect of spectral bandwidth and positioning on the spectral signature analysis of inland waters. *Remote Sensing of Environment*, **41**, pp. 211-225.
- Dell'Acqua, F., Gamba, P., Ferrari, A., Palmason, J.A., Benediktsson, J.A., Arnason, K. (2004): Exploiting Spectral and Spatial Information in Hyperspectral Urban Data With High Resolution. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. **1**, No. 4, pp. 322-326.
- Dell'Acqua, F., Gamba, P., Lisini, G. (2005): Urban land cover mapping using hyperspectral and multispectral VHR sensors: Spatial versus spectral resolution. *Proc. URBAN, IAPRS*, Vol. 36, Issue: PART 8 W27
- Del Frate, F., Pacifici, F., Schiavon, G., Solimini, C. (2007): Use of neural networks for automatic classification from high-resolution images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45**, pp. 800-809.
- Diker, K., Heermann, D.F., Bausch, W.C., Wright, D.K. (2004): Shannon-Wiener's diversity index for linking yield monitor and remotely sensed data for corn. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **47**, pp. 1347-1354.
- Donnay, J.-P., Barnsley, M.J., Longley, P.A. (2001): Remote Sensing and Urban Analysis. In: Donnay, J.-P., Barnsley, M.J., Longley, P.A. (Eds.): *Remote Sensing and Urban Analysis*. Taylor & Francis, London, pp. 2-14. ISBN: 0-203-30606-6
- Duca, R., Del Frate, F., Roca, F.G. (2008): From multi-spectral to hyper-spectral imagery: A quantitative analysis of the improvements in terms of land cover classification. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 4
- Dueker, K.J., F.E. Horton (1972): Urban-change detection systems: Remote-sensing inputs. *Photogrammetria*, **28**, pp. 89-106.
- Eliasson, I. (1992): Infrared thermography and urban temperature patterns. *International Journal of Remote Sensing*, **13**, pp. 869-879.
- Falcone, J.A., Gomez, R. (2005): Mapping impervious surface type and sub-pixel abundance using hyperion hyperspectral imagery. *Geocarto International*, **20**, pp. 3-10.
- Fauvel, M., Chanussot, J., Benediktsson, J.A. (2006): A combined support vector machines classification based on decision fusion. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 2494-2497.
- Fauvel, M., Chanussot, J., Benediktsson, J.A. (2009): Kernel principal component analysis for the classification of hyperspectral remote sensing data over urban areas. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*
- Fauvel, M., Chanussot, J., Benediktsson, J.A., Sveinsson, J.R. (2008): Spectral and spatial classification of hyperspectral data using SVMs and morphological profiles. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 4834-4837.
- Finney, A. (2007): Infrared photography. In: Peres, M.R. (Ed.): *Focal encyclopedia of photography*. 4th edition. Elsevier, Amsterdam, p. 556-562. ISBN: 978-0240807409
- Forster, B.C. (1983): Some urban measurements from Landsat data (Sydney, Australia). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **49**, pp. 1693-1707.
- Forster, B.C. (1985): An examination of some problems and solutions in monitoring urban areas from satellite platforms. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, pp. 139-151.
- Frank M. (2013): *Automitikus felületmodell-előállítás és szoláris energia-bevétel számítás egy szegedi mintaterületen*. Diplomamunka, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék
- Franke, J., Roberts, D.A., Halligan, K., Menz, G. (2009): Hierarchical Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) of hyperspectral imagery for urban environments. *Remote Sensing of Environment*, **113**, pp. 1712-1723.
- Fraser, C.S., Ogleby, C.L., Collier, P.A. (1995): Evaluation of a small format aerial mapping system. *Australian Surveyor*, **40**, pp. 10-15.
- Fung, T., Ma, F.Y., Siu, W.L. (1998): Hyperspectral data analysis for subtropical tree species recognition. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 3, pp. 1298-1300.
- Gamba, P., Houshmand, B. (2001): Integration of hyperspectral and IFSAR data for improved 3D urban profile reconstruction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **67**, pp. 947-956.
- Gao, B.C., Heidebrecht, K.B., Goetz, A.F.H. (1993): Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, **44**, pp. 165-178.
- Goetz, A.F.H. (2009): Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, **113**, pp. S5-S16.
- Goetz, A.F.H., Vane, G., Solomon, J.E., Rock, B.N. (1985): Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, **228**, pp. 1147-1153.
- Goldreich, Y. (1985): The structure of the ground heat island in a central business district. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **24**, pp. 1237-1244.
- Gong, P., Marceau, D.J. Howarth, P.J. (1992): A comparison of spatial feature extraction algorithms for land-use classification with SPOT HRV data. *Remote Sensing of Environment*, **40**, pp. 137-151.

- Graham, R.W. (1988): Small format aerial surveys from light and microlight aircraft. *Photogrammetric Record*, **12**, pp. 561-573.
- Green, A.A., Berman, M., Switzer P., Craig, M.D. (1988): Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **26**, pp. 65-74.
- Greiwe, A., Bochow, M., Ehlers, M. (2004): Fusion Of Multisensor Remote Sensing Data For Urban Land Cover Classification. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 5239, pp. 306-313.
- Haala, N., C. Brenner, C. (1999): Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **54**, pp. 130-137.
- Hamann, R., Johnson, W., Moody, N., Meyer, M. (1984): Small scale 35mm aerial photography for aspen delineation (Minnesota). *Remote Sensing Laboratory, Institute of Agriculture, Forestry & Home Economics*, University of Minnesota, St. Paul, IAFHE RSL Research Report, **84-3**
- Hapke, C., Richmond, B. (2000): Monitoring beach morphology changes using small-format aerial photography and digital softcopy photogrammetry. *Environmental Geosciences*, **7**, pp. 32-37.
- Haramis, G.M., Goldsberry, J.R., McAuley, D.G., Derleth, E.L. (1985): An aerial photographic census of Chesapeake Bay and North Carolina canvasbacks. *Journal of Wildlife Management*, **49**, pp. 449-454.
- Hargitai, H. (2006): A hiperspektrális képfeldolgozás módszerei és az első magyarországi képalkotó spektrométeres repülés adatainak elemzése. PhD disszertáció, ELTE, 10 p.
- Hargitai, H., Kardeván, P., Horváth, F. (2006): Az első magyarországi képalkotó spektrométeres repülés és adatainak elemzése erdőtípusok elkülönítésére. *Geodézia és Kartográfia*, **LVIII/9**, pp. 21-33.
- Harney, B.M., McCrea, D.H., Forney, A.J. (1973): Aerial detection of vegetation damage utilizing a simple 35 mm camera system. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **23**, pp. 788-790.
- Harris, P.M., Ventura, S.J. (1995): The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **61**, pp. 993-998.
- Heiden, U., Segl, K., Roessner, S., Kaufmann, H. (2007): Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, **111**, pp. 537-552.
- Henits L., Tobak Z., Mucsi L., van Leeuwen B., Szatmári J. (2011): Nagy felbontású távérzékelt adatok alkalmazása a városi felszínborítás vizsgálatában - lehetőségek és problémák. In: Dr Lóki József (szerk.): *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában II.: Térinformatikai konferencia és szakkiallítás*, Debrecen, 2011.05.19-2011.05.20., pp. 43-51. ISBN:978-963-318-116-4
- Hepner, G.F., Houshmand, B., Kulikov, I., Bryant, N. (1998): Investigation of the integration of AVIRIS and IFSAR for urban analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **64**, pp. 813-820.
- Herold, M., Gardner, M., Roberts, D.A. (2003): Spectral resolution requirements for mapping urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, pp. 1907-1919.
- Herold, M., Menz, G. (2001): Remote sensing and landscape metrics - Investigations of spatial structural analysis of urban regions. *Erdkunde*, **55**, pp. 379-393.
- Herold, M., Roberts, D.A. (2010): The Spectral Dimension in Urban Remote Sensing. In: Rashed, T., Jürgens, C. (Eds.): *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. Remote Sensing and Digital Image Processing 10, Springer, pp. 47-65. ISBN: 978-1-4020-4371-0
- Herold, M., Roberts, D.A., Gardner, M.E., Dennison, P.E. (2004): Spectrometry for urban area remote sensing - Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, **91**, pp. 304-319.
- Herold, M., Roberts, D.A., Noronha, V., Smadi, O. (2008): Imaging spectrometry and asphalt road surveys. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **16**, pp. 153-166.
- Hinz, S., Baumgartner, A. (2003): Automatic extraction of urban road networks from multi-view aerial imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **58**, pp. 83-98.
- Hofstee, P. (1984): Simple and cheap do-it-yourself technique. *Cities*, **1**, pp. 243-247.
- Huang, X., Zhang, L. (2009): A comparative study of spatial approaches for urban mapping using hyperspectral ROSIS images over Pavia City, northern Italy. *International Journal of Remote Sensing*, **30**, pp. 3205-3221.
- Hunt, G.R. (1977): Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, **42**, pp. 501-513.
- Jensen, J.R. (2007): *Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective*. 2nd edition. Prentice Hall Series in Geographic Information Science, Upper Saddle River, New Jersey, United States, 592 p.
- Jensen, J.R., Cowen, D.C. (1999): Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **65**, pp. 611-622.

- Jimenez, L., Landgrebe, D.A. (1999): Hyperspectral data analysis and supervised feature reduction via projection pursuit. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **37**, pp. 2653–2667.
- Jung, A., Götze, C., Glässer, C. (2012): Overview of Experimental Setups in Spectroscopic Laboratory Measurements - the SpecTour Project. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2012/4, pp. 433-442.
- Jung, A., Kardeván, P., Tőkei, L. (2005): Detection of urban effect on vegetation in a less built-up Hungarian city by hyperspectral remote sensing. *Physics and Chemistry of the Earth*, **30**, pp. 255-259.
- Jung, A., Michels, R., Graser, R. (2013): Hand-held imaging spectroscopy and hyperspectral video technique. *Proceedings, 8th EARSeL SIG Imaging Spectroscopy Workshop*, 8-10 April, Nantes, France
- Jung, A., Tőkei, L., Kardeván, P. (2007): Application of airborne hyperspectral and thermal images to analyse urban microclimate. *Applied Ecology and Environmental Research*, **5**, pp. 165-175.
- Juppenlatz, M. (1991): Urban environmental surveys. Information gathering, low cost aerial photography and town management. *Cities*, **8**, pp. 2-9.
- Kalman, L.S., Bassett III, E.M. (1997): Classification and material identification in an urban environment using HYDICE hyperspectral data. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 3118, pp. 57-68.
- Kardeván, P., Vekerdy, Z., Róth, L., Sommer, S., Kemper, T., Jordan, Gy., Tamás, J., Pechmann, I., Kovács, E., Hargitai, H., László, F. (2003): Outline of scientific aims and data processing status of the first Hungarian hyperspectral data acquisition flight campaign, HYESNS 2002 HUNGARY. *Proceedings at the 3rd EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy*, May 13-16 2003, Herrsching, Germany, pp.324-332.
- Key, T., Warner, T.A., McGraw, J.B., Fajvan, M.A. (2001): A comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate hardwood forest. *Remote Sensing of Environment*, **75**, pp. 100-112.
- Kitka G., Szatmári J., Mucsi L., Tobak Z., van Leeuwen B. (2010): Digitális légifelvételek alkalmazása a környezetvédelmi ellenőrzési folyamatokban. In: Lóki József, Demeter Gábor (szerk.): *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: Térinformatikai konferencia és szakkiallítás*, Debrecen, 2010.06.10-2010.06.11., pp. 430-431. ISBN:978-963-06-9341-7
- Klein, W.H. (1970): Mini-aerial photography. *Journal of Forestry*, **68**, pp. 475-478.
- Kozma-Bognár, V., Berke, J. (2010): New Evaluation Techniques of Hyperspectral Data. *Journal of Systemics. Cybernetics and Informatics*, Vol. 8, Number 5. pp. 49-53.
- Krapez, J.C., Chatelard, C., Nouvel, J.F., Déliot, P. (2012): Combined airborne thermography and visible-to-near infrared reflectance measurement for soil moisture mapping. *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., Huntington, J.F., Mason, P., Quigley, M.A. (2002): Evaluation and validation of EO-1 Hyperion for geologic mapping. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) Proceedings*, pp. 593-595.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., Lefkoff, A.B., Young, J.M., Kierein-Young, K.S., Cocks, T.D., Jenssen, R., Cocks, P.A. (2000): HyMap: An Australian Hyperspectral Sensor Solving Global Problems – Results from USA HyMap Data Acquisitions. *Proceedings of the 10th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference*, 21-25 August 2000, Adelaide, Australia
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., Goetz, A.F.H. (1993): The spectral image processing system (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, **44**, pp. 145-163.
- KSH (2012): *Magyarország közigazgatási helynévkönyve*, Központi Statisztikai Hivatal, Budapest, 2012., 228 p.
- Kupfer, G., Turkstra, J., Hofstee, P. (1987): Spatial growth of unplanned areas in Nairobi. Use of aerial photography for monitoring urban growth and improvement planning. *ITC Journal*, **3**, pp. 239-247.
- Lemp, D., Weidner, U. (2005): Segment-based characterization of roof surfaces using hyperspectral and laser scanning data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 7, pp. 4942-4945.
- Lénárt, Cs., Burai, P., Smailbegovic, A., Biro, T., Katona, Zs., Andricevic, R. (2011): Multisensor integration and mapping strategies for the detection and remediation of the red mud spill in Kolontár, Hungary: Estimating the thickness of the spill layer using hyperspectral imaging and LIDAR whispers. *Workshop*. Lisbon, Portugal, 6-9 June 2011.
- Li, J., Li, Y., Chapman, M.A., Rüther, H. (2005): Small format digital imaging for informal settlement mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 71, Issue 4, pp. 435-442.
- Liew, S.C., Chang, C.W., Kwoh, L.K. (2003): Image fusion of Hyperion and Ikonos imagery. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 4898, pp. 31-35.

- Liu, D., Song, K., Zhang, B., Li, F. (2005): Hyperspectral approaches for detecting the roadside tree chlorophyll content with BP neural networks. *Forest Research*, Vol. 19, Issue 1, pp. 3032-3035.
- Long, H., Zhao, Z. (2005): Urban road extraction from high-resolution optical satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, pp. 4907-4921.
- Ludlow, D., Steinborn, W. (2009): The European Urban Atlas – Supporting city habitability – Challenging Earth observation. *Towards eEnvironmenta Conference*, Pargue, 25-27. March 2009
- Lyle, S.D. (2003): New approach in using eRTK-GPS for direct georeferencing of aerial images in a GIS application. *Surveying and Land Information Science*, **63**, pp. 161-168.
- Madhok, V., Landgrebe, D. (1999): Supplementing hyperspectral data with digital elevation. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 1, pp. 59-61.
- Marino, A., Ciucci, M., Ludovisi, G., Moccald, A. (2002): Remote sensing as a support for urban and land-use planning. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 4814, pp. 16-22.
- Mason, S., Rüther, H., Smit, J. (1997): Investigation of the Kodak DCS460 digital camera for small-area mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **52**, pp. 202-214.
- Mezősi, G., Mucsi, L., Farsang, A. (1999): A városökológia szerepe a területi tervezésben Szeged példáján. In: Alföldi Tanulmányok – Nagyvárosok 1998/99. Nagy Alföld Alapítvány, Békéscsaba, pp. 74-93.
- Milics, G., Neményi, M. (2007): Adatgyűjtés műszaki és informatikai háttere. In: Németh, T., Neményi, M., Harnos, Zs. (szerk.): *A precíziós mezőgazdaság módszertana*. JATE Press-MTA TAKI, Szeged, pp. 139-159.
- Mills, J.P., Newton, I., Graham, R.W. (1996): Aerial photography for survey purposes with a high resolution, small format, digital camera. *Photogrammetric Record*, **15**, pp. 575-587.
- Misra, P. (1986): Small format aerial photography - a new planning and administrative tool for town planners in India. *Remote sensing for resources development and environmental management*. 7th ISPRS Commission VII symposium, Enschede, 1986. **2**, pp. 853-855.
- Mucsi, L. (1996): *A városökológia elmélete és gyakorlati alkalmazása Szeged példáján*, PhD disszertáció. Kézirat Szeged, 92 p
- Mucsi, L. (2001): A termális képkészítő és elemző rendszer (teker) fejlesztése c. projekt bemutatása. I. Magyar Földrajzi Konferencia, Szeged, 2001. október 25-27.
- Mucsi, L. (2003): Képfeldolgozás. In: Bódis, K.: *Térinformatika döntés előkészítőknél és döntéshozóknak*. Phare HU00008-02-01-0023 képzési program, CD kiadvány, pp. 41-44.
- Mucsi L., Kovács F., Henits L., Tobak Z., van Leeuwen B., Szatmári J., Mászáros M. (2007a): Városi területhasználat és felszínborítás vizsgálata távérzékeléses módszerekkel. In: Mezősi G. (szerk.): *Városökológia, Földrajzi Tanulmányok 1*, Szeged: JATEPress, 2007. pp. 19-42.
- Mucsi L., Szatmári J., Tobak Z., van Leeuwen B., Henits L., Szántó G. (2012): A városi táj felszínborítottságának és a területhasználat távérzékelésen alapuló térképezésének módszertani kérdései. In: Farsang A, Mucsi L, Keveiné Bárány I (szerk.): *Táj - érték, lépték, változás*, Szeged: GeoLitera, pp. 119-134. ISBN:978-963-306-151-0
- Nagy, A., Tamás, J. (2008): Nehézfémekkel szennyezett területek értékelése távérzékelte adatok alapján. *Talajvédelem*, különszám, pp. 291-300.
- Nazim, M., Kala, R.P. (1992): Updating urban maps with analytically rectified Small Format Aerial Photographs. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **20**, pp. 1-7.
- Neidert, D., Kristóf, D., Solt, Sz., Fehérvári, P., Palatitz, P. (2007): Kék vércse élőhely térképezés nagy felbontású úrfelvételek alkalmazásával a Vásárhelyi-pusztákon. *IV. Magyar Természetvédelmi Biológiai Konferencia – műhelytalálkozó*. Tokaj, 2007. március 29-31.
- Németh, Cs. (2010): *A hőterképezés alkalmazásai, a panelprogram értékelése légi hőfelvételek alapján*. OFDK pályamunka, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék
- Nichol, J.E. (1996): High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: A satellite-based study. *Journal of Applied Meteorology*, **35**, pp. 135-146.
- Nichol, J., Lee, C.M. (2005): Urban vegetation monitoring in Hong Kong using high resolution multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, pp. 903-918.
- Pacirici, F., Solimini, C. (2007): An innovative neural-net method to detect temporal changes in high-resolution optical satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45**, pp. 2940-2952.
- Palmason, J.A., Benediktsson, J.A., Sveinsson, J.R., Chanussot, J. (2005): Classification of hyperspectral data from urban areas using morphological preprocessing and independent component analysis. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 1, pp. 176-179.
- Palmason, J.A., Benediktsson, J.A., Sveinsson, J.R., Chanussot, J. (2006): Fusion of morphological and spectral information for classification of hyperspectral urban remote sensing data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 2506-2509.

- Pascucci, S., Bassani, C., Fusilli, L., Palombo, A. (2007): Evaluation of a hyperspectral scanner allowing for deterioration status assessment of asbestos-cement roofing sheets. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 6749
- Pascucci, S., C. Belviso, R. M. Cavalli, G. Laneve, A. Misurovic, C. Perrino, and S. Pignatti (2009): Red mud soil contamination near an urban settlement analyzed by airborne hyperspectral remote sensing. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vol. 4
- Plaza, A., Martínez, P., Plaza, J., Pérez, R. (2005): Dimensionality reduction and classification of hyperspectral image data using sequences of extended morphological transformations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **43**, pp. 466-479.
- Plaza, J., Plaza, A., Pérez, R., Martínez, P. (2008): Parallel classification of hyperspectral images using neural networks. *Studies in Computational Intelligence*, Vol. 133
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Dezső, Zs. (2010): Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. *Physics and Chemistry of Earth* **35**, pp. 95-99.
- Poole, P.J. (1989): The prospects for small format photography in Arctic animal surveys. *Photogrammetric Record*, **13**, pp. 229-236.
- Puissant, A., Hirsch, J., Weber, C. (2005): The utility of texture analysis to improve per-pixel classification for high to very high spatial resolution imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, pp. 733-745.
- Qiu, H.L., Lam, N.S.N., Quattrochi, D.A., Gamon, J.A. (1999): Fractal characterization of hyperspectral imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **65**, pp. 63-71.
- Quattrochi, D.A., Ridd, M.K. (1998): Analysis of vegetation within a semi-arid urban environment using high spatial resolution airborne thermal infrared remote sensing data. *Atmospheric Environment*, **32**, pp. 19-33.
- Rakonczai, J., Unger, J., Mucsi, L., Szatmári, J., Tobak, Z., van Leeuwen, B., Gál, T., Fiala, K. (2009): A napfény városa naplemente után - Légi távérzékeléses módszerrel támogatott hősziget-térképezés Szegeden. *Földrajzi Közlemények*, **133. 4.**, pp. 367-383.
- Richards, J.A., Jia, X. (2006): Remote Sensing Digital Image Analysis – An Introduction, Springer-Verlag, Berlin, 273 p. ISBN: 978-3-540-25128-6
- Richter, R. (1996): Atmospheric correction of DAIS hyperspectral image data. *Computers and Geosciences*, **22**, pp. 785-793.
- Richter, R., Schläpfer, D. (2011): Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery. DLR report, 17 p.
- Ridd, M.K. (1995): Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, **16**, pp. 2165-2185.
- Roessner, S., Segl, K., Heiden, U., Kaufmann, H. (2001): Automated differentiation of urban surfaces based on airborne hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, pp. 1525-1532.
- Roth, M., Oke, T.R., Emery, W.J. (1989): Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, **10**, pp. 1699-1720.
- Rowe, J.P., Warner, T.A., Dean Jr., D.R., Egan, A.F. (1999): A remote sensing strategy for measuring logging road system length from small-format aerial photography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **65**, pp. 697-703.
- Sawaya, K.E., Olmanson, L.G., Heinert, N.J., Brezonik, P.L., Bauer, M.E. (2003): Extending satellite remote sensing to local scales: Land and water resource monitoring using high-resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, **88**, pp. 144-156.
- Schiefer, S., Hostert, P., Damm, A. (2006): Correcting brightness gradients in hyperspectral data from urban areas. *Remote Sensing of Environment*, **101**, pp. 25-37.
- Segl, K., Roessner, S. (1999): Pixeloriented selection of endmember combinations for linear stochastic spectral unmixing applied to urban environments. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 3753, pp. 327-338.
- Shackelford, A.K., Davis, C.H. (2003): A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high-resolution multispectral data over urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, pp. 2354-2363.
- Shi, W., Zhu, C. (2002): The line segment match method for extracting road network from high-resolution satellite images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**, pp. 511-514.
- Sicot, G., Lennon, M., Smet, S., Kohaut, P. (2011): From the land to the sea: seamless cartography of coastal algae using airborne hyperspectral remote sensing. *Proceedings, 7th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Edinburgh, Scotland, 11- 13 April, 2011
- Skauli, T., Goa, P.E., Baarstad I., Loke, T. (2006): A compact combined hyperspectral and polarimetric imager. *Proc. SPIE*, Vol. 6395

- Small, C. (2001): Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, **22**, pp. 1305-1334.
- Small, C. (2003): High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **88**, pp. 170-186.
- Smith, M.O., Johnson, P.E., Adams, J.B. (1985): Quantitative Determination of Mineral Types and Abundances From Reflectance Spectra Using Principal Components Analysis. *Journal of Geophysical Research*, Vol.90, pp. C797-C804.
- Smith, R.B. (2012): *Analyzing Hyperspectral Images with TNTmips*. TNTmips Tutorial Booklet, MicroImages
- Spencer, R.D. (1978): Map intensification from small format camera photography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **44**, pp. 697-707.
- Spencer, R.D. (1998): Small format aerial photography: Methods and achievements in Australian forestry. *Australian Forestry*, **61**, pp. 267-274.
- Stefanov, W.L., Ramsey, M.S., Christensen, P.R. (2001): Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sensing of Environment*, **77**, pp. 173-185.
- Streutker, D.R. (2002): A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, **23**, pp. 2595-2608.
- Sugumaran, R., Voss, M. (2007): Object-oriented classification of LIDAR-fused hyperspectral imagery for tree species identification in an Urban environment. *2007 Urban Remote Sensing Joint Event*, URS
- Szatmári J., Tobak Z., van Leeuwen B., Dolleschall J. (2011): A belvízelöntések térképezését megalapozó adatgyűjtés és a belvízképződés modellezése neurális hálózattal. *Földrajzi Közlemények* 135:(4) pp. 351-364.
- Szatmári J., van Leeuwen B., Tobak Z., Rakonczai J., Mucsi L., Unger J., Gál T., Fiala K., Németh Cs. (2010): Légi távérzékeléses módszerrel támogatott hőtéreképezés Szegeden. In: Lóki József, Demeter Gábor (szerk.): *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: Térinformatikai konferencia és szakkiallítás*, Debrecen, 2010.06.10-2010.06.11., pp. 321-328. ISBN:978-963-06-9341-7
- Szeged megyei jogú város integrált városfejlesztési stratégiája (2008)
http://www.szegedvaros.hu/letoelthet-anyagok/doc_download/1828-ivs-1-fejezet.html
- Tamás, J., Lénárt, Cs., Burai, P. (2009): Evaluation of applicability of airborne AISA DUAL hyperspectral imaging system to map environmental conditions in orchards. *International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. Conference "Technology and Management to Increase the Efficiency in Sustainable Agricultural Systems"*, 1-4 September, 2009, Rosario, Argentina
- Tamás, J., Lénárt, Cs., Burai, P., Fenyvesi, L., Deákvári, J., Kovács, L. (2009): Evaluation of spatial accuracy of biomass spectral datacubes based on aisa dual flight campaigns. *International Symposia Risk Factors for Environment and Food Safety & Natural Resources and Sustainable Development*, 6-7 November 2009, Oradea, Romania
- Tamás, J., Nagy, A., Szabó, Z. (2010): Körte fajták génbanki állományára alapozott hiperspektrális értékelése. *LII Georgikon Napok*, Keszthely, 2010. szeptember 30-október 1.
- Tappe, N.W. (1980): Urban development and flood hazards at shepparton. *Proceedings - Micro-Delcon*, pp. 213-219.
- TerraVerde (2008): *Multispectral Cameras – MS4100 and MS3100*. Termékleírás
- The World Bank (2012): Data Catalog. <http://datacatalog.worldbank.org/>
- Thomas, N., Hendrix, C., Congalton, R.G. (2003): A comparison of urban mapping methods using high-resolution digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **69**, pp. 963-972.
- Tobak Z., Csendes B., Henits L., van Leeuwen B., Szatmári J., Mucsi L. (2012a): Városi felszín spektrális tulajdonságainak vizsgálata légifelvételek alapján. In: Lóki József dr (szerk.): *Az elmélet és gyakorlat találkozása a térinformatikában III. - Térinformatikai konferencia és szakkiallítás*, Debrecen, 2012.05.24-2012.05.25., Debrecen: Debreceni Egyetemi Kiadó, pp. 413-420. ISBN:978-963-318-218-5
- Tobak Z., Csendes B., Henits L., van Leeuwen B., Mucsi L. (2012b): A városi felszín spektrális tulajdonságainak vizsgálata légifelvételek alapján. In: Nyári D (szerk.): *Kockázat - Konfliktus - Kihívás: A VI. Magyar Földrajzi Konferencia, a MERIEXWA nyitókonferencia és a Geográfus Doktoranduszok Országos Konferenciájának Tanulmánykötete*, Szeged, 2012.09.05-2012.09.07., Szeged: SZTE TTK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, pp. 1088-1097. ISBN:978-963-306-175-6
- Tobak Z., Csendes B., Henits L., van Leeuwen B., Mucsi L. (2013): Légifelvételek spektrális és térbeli információtartalmának felhasználása a városi felszínborítás térképezésében. In: Dr Lóki József (szerk.), *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában IV.*, Debrecen, 2013.05.23-2013.05.24. Debrecen: Debreceni Egyetemi Kiadó, pp. 441-450. ISBN:978-963-318-334-2

- Tobak, Z., Szatmári, J., van Leeuwen, B. (2008a): Small format aerial photography - Remote sensing data acquisition for environmental analysis. *Journal of Environmental Geography*, I:(3-4) pp. 21-26.
- Tobak, Z., Kitka, G., Szatmári, J., van Leeuwen, B., Mucsi, L. (2008b): Kísérési, kisformátumú CIR légifelvétel készítése, feldolgozása és alkalmazása környezeti vizsgálatokban. In: Szabó, V., Orosz, Z., Nagy, R., Fazekas I (szerk.): *IV. Magyar Földrajzi Konferencia*, Debrecen, 2008. November 14-15.
- Tolner, I. (2011): Hazai esettanulmányok az AISA Dual hiperspektrális légi rendszer alkalmazásához. *XVI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka*. Kolozsvár, Románia, 2011. március 24-25. pp. 345-348.
- Tong, Q., Zhang, B., Zheng, L. (2004): Hyperspectral remote sensing technology and applications in China. *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, pp. 190-199.
- Trimble (2010): eCognition® 8.0: Guided Tour Level 1
- Trimble (2012): *eCognition Developer 8.7.1. Reference Book*. Trimble Documentation, München, pp. 27-47.
- Unger, J. (2007): A város éghajlat-módosító hatása – a szegedi hősziget, In: Mezösi G. (szerk.) *Városökológia, Földrajzi Tanulmányok 1*. JATE Press, 43-65.
- Unger J., Gál T., Rakonczai J., Mucsi L., Szatmári J., Tobak Z., van Leeuwen B., Fiala K. (2009): Air temperature versus surface temperature in urban environment. In: *The 7th International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japán, 2009.06.29-2009.07.03., Paper 375624-1-090514014110-003.
- Unger, J., Gál, T., Rakonczai, J., Mucsi, L., Szatmári, J., Tobak, Z., van Leeuwen, B. (2010a): Modeling of the urban heat island pattern based on the relationship between surface and air temperature. *Időjárás*, **114**, **4**, pp. 287-302.
- Unger J., Gál T., Rakonczai J., Mucsi L., Szatmári J., Tobak Z., van Leeuwen B., Fiala K. (2010b): Városi hősziget mező modellezése légi felszínhőmérsékleti mérések alapján. In: Putsay M (szerk.): *Műholdmeteorológia*, **35**. Meteorológiai Tudományos napok, Budapest, 2009.11.19-2009.11.20., pp. 57-60. ISBN:978-963-9931-09-3
- Van der Linden, S., Hostert, P. (2009): The influence of urban structures on impervious surface maps from airborne hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, **113**, pp. 2298-2305.
- Van Der Linden, S., Janz, A., Waske, B., Eiden, M., Hostert, P. (2007): Classifying segmented hyperspectral data from a heterogeneous urban environment using support vector machines. *Journal of Applied Remote Sensing*, **1**
- Van Leeuwen, B., Mezösi, G., Tobak, Z., Szatmári, J., Barta, K. (2012a): Identification of inland excess water floodings using an artificial neural network. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, **7**:(4) pp. 173-180.
- Van Leeuwen B., Szatmári J., Tobak Z., Németh Cs., Hauberger G. (2009a): Opportunities for the generation of high resolution digital elevation models based on small format aerial photography. In: *HunDEM 2009 GeoInfo 2009*, Miskolc, 2009.04.24-2009.04.25., pp. 100-108.
- Van Leeuwen B., Tobak Z., Szatmári J. (2008): Development of an integrated ANN-GIS framework for inland excess water monitoring. *Journal of Environmental Geography* **I**:(3-4), pp. 1-6.
- Van Leeuwen B., Tobak Z., Szatmári J. (2012b): Belvíz osztályozás hagyományos módszerrel és mesterséges neurális hálóval. In: Nyári D (szerk.): *Kockázat - Konfliktus - Kihívás: A VI. Magyar Földrajzi Konferencia, a MERIEXWA nyitókonferencia és a Geográfus Doktoranduszok Országos Konferenciájának Tanulmánykötete*, Szeged, 2012.09.05-2012.09.07., Szeged: SZTE TTK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, pp. 524-529. ISBN:978-963-306-175-6
- Van Leeuwen B., Tobak Z., Szatmári J., Barta K. (2010): Új módszerek alkalmazása a belvizek keletkezésének vizsgálatában és monitorozásában. In: Lóki József, Demeter Gábor (szerk.): *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: Térinformatikai konferencia és szakkiallítás*, Debrecen, 2010.06.10-2010.06.11., pp. 121-130. ISBN:978-963-06-9341-7
- Van Leeuwen, B., Tobak, Z., Szatmári, J., Mucsi, L., Fiala, K., Mezösi, G. (2009b): Small format aerial photography: a cost effective approach for visible, near infrared and thermal digital imaging. In: Car, A., Griesebner, G., Strobl, J. (Eds.): *Geospatial crossroads*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 200-209.
- Van Mol, B., Ruddick, K. (2004): The Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS): the future of hyperspectral satellite sensors. Imagery of Oostende coastal and inland waters. *Proceedings of the Airborne Imaging Spectroscopy workshop*, 8 October 2004, Bruges, Belgium. pp. 1-10.
- Visiné Rajczai, E., Burai, P., Király, G., Albert L. (2012): Soproni zöldterületek ökológiai jellemzése növénykémiailag és hiperspektrális felvételezés alapján. In: Albert L., Bidló, A., Jancsó, T., Gribovszki, Z. (szerk.): *Városok öko-környezetének komplex vizsgálata a nyugat-dunántúli régióban*, NYME, Sopron, pp. 231-236.
- Visiné Rajczai, E., Király, G. (2011): Soproni zöldterületek ökológiai jellemzése klorofilltartalom alapján: Városok öko-környezetének komplex vizsgálata a nyugat-Dunántúli régióban. *Szakmai fórum*. Székesfehérvár, 2011. november 4.

- Voogt, J.A., Oke, T.R. (1998): Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, pp. 895-920.
- Voogt, J.A., Oke, T.R. (2003): Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, **86**, pp. 370-384.
- Voss, M., Sugumaran, R. (2008): Seasonal effect on tree species classification in an urban environment using hyperspectral data, LiDAR, and an object-oriented approach. *Sensors*, **8**, pp. 3020-3036.
- Wang, F., Li, X., Zhuo, L., Xia, L.H., Qian, J.P., Ai, B. (2007): Stressed level of urban vegetation: Its assessment based on Hyperion hyperspectral data. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **18**, pp. 1286-1292.
- Wania, A., Weber, C. (2007): Hyperspectral imagery and urban green observation. *2007 Urban Remote Sensing Joint Event*, URS
- Warner, W.S. (1989): Creating digital terrain models from 35 mm photography. *Photogrammetric Record*, **13**, pp. 249-255.
- Wei, Y., Zhao, Z., Song, J. (2004): Urban building extraction from high-resolution satellite panchromatic image using clustering and edge detection. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International*, **3**, pp. 2008-2010.
- Welch, R. (1980): Monitoring urban population and energy utilization patterns from satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, **9**, pp. 1-9.
- Welch, R. (1982): Spatial resolution requirements for urban studies (Asia). *International Journal of Remote Sensing*, **3**, pp. 139-146.
- Weng, Q. (2003): Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **69**, pp. 555-566.
- Weng, Q., Hu, X., Lu, D. (2008): Extracting impervious surfaces from medium spatial resolution multispectral and hyperspectral imagery: A comparison. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, pp. 3209-3232.
- Weng, Q., Lu, D., Schubring, J. (2004): Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, **89**, pp. 467-483.
- Wessman, C.A., Aber, J.D., Peterson, D.L., Melillo, J.M. (1988): Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen cycling in temperate forest ecosystems. *Nature*, **335**, pp. 154-156.
- Woodcock, W.E. (1976): Aerial reconnaissance and photogrammetry with small cameras. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **42**, pp. 503-511.
- Woodcock, C.E., Strahler, A.H. (1987): The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, **21**, pp. 311-332.
- Wracher, D.A. (1973): Small format aerial photography. *Min Eng (NY)*, **25**, pp. 47-48.
- Wu, C., Murray, A.T. (2003): Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, **84**, pp. 493-505.
- Xu, W., Wooster, M.J., Grimmond, C.S.B. (2008): Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature-emissivity separation approach. *Remote Sensing of Environment*, **112**, pp. 3493-3510.
- Yang, L., Xian, J.G., Klaver, M., Deal, B. (2003): Urban land-cover change detection through sub-pixel imperviousness mapping using remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **69**, pp. 1003-1010.
- Zahorcak, M. (2007): Evolution of the photographic lens in the 19th century. In: Peres, M.R. (Ed.), *Focal encyclopedia of photography*. 4th edition. Elsevier, Amsterdam, pp. 157-176. ISBN: 978-0240807409
- Zhang, B., Liu, J., Wang, X., Wu, C. (1998): Study on the classification of hyperspectral data in urban area. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 3502, pp. 169-172.
- Zhang, B., Wang, X., Liu, J., Zheng, L., Tong, Q. (2000): Hyperspectral image processing and analysis system (HIPAS) and its applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **66**, pp. 605-609.
- Zhang, Q., Couloigner, I. (2006): Benefit of the angular texture signature for the separation of parking lots and roads on high resolution multi-spectral imagery. *Pattern Recognition Letters*, **27**, pp. 937-946.

SUMMARY

During the last decade, Szeged, like many other large cities – due to urbanization and urban development – went through significant changes. This process can be observed the best from the perspective of change of the built-up area, land cover and land use. The temporal, spectral and spatial resolution of the national aerial photography campaigns - that were earlier executed every 5 years - was not high enough to accurately track the rapid changes. The quality and quantity of the datasets has significantly improved since the change of the millennium when modern aerial data acquisition techniques became common in Hungary. Apart from the data collection improvements, also important developments have occurred in data processing techniques, hardware and software components and human capacity as well.

In this study, aerial remote sensing data with various spectral and spatial resolutions were used. The imagery was partly collected by an in-house developed data collection system which development and operation was described in detail. Three different types of cameras were successfully built into a 4-seat airplane. Flight planning, power problems, navigation and data storage challenges have been dealt with as well. The coarse geometric correction of the color infrared (CIR) and thermal (TIR) imagery has been solved by post processing of the navigational data using custom ArcView and ArcGIS scripts. Mosaics of 50 cm CIR and 2.5 meter TIR images have been created from the complete area within the levees surrounding the inner city of Szeged. Using a Trimble data acquisition system with a spatial resolution of 10 cm, true color data was collected from the city. Due to its superior operability and flexibility compared to traditional aerial photography campaigns, small format data collection using small airplanes is become increasingly popular. Nevertheless, problems with the current processing methods, in particularly with accurate georeferencing and radiometric correction of the CIR images, should not be underestimated.

In case of the earlier preprocessed AISA Dual hyperspectral data – besides a theoretical description of the radiometric, geometric and atmospheric calibration - the opportunities for optimization of the data set, like spatial and spectral dimension reduction were analyzed. On one hand, data reduction was performed by the selection of study areas, while on the other hand, 119 noisy bands were filtered out manually, as well as by applying PCA and MNF transformations.

The study areas of this research were selected based on their built-up characteristics. They also had to represent the particular land cover types occurring in Szeged, as well as the different types of built-up areas and surfaces that can be found in large cities in Hungary in general. In the area of Alsóváros mostly family houses with gardens and relatively narrow streets can be found. In the inner city, apart from high density built-up and tall buildings, wide streets are common. In the Tarján area, high rise apartment buildings with large green areas surrounding them are characteristic.

For the evaluation of the classifications, field reference maps and a data collection method, based on Digiterria Explorer, were developed. Apart from the preprocessing phase in the office, the method controls the field work, while giving special attention to characteristic mapping errors (e.g. building displacement, cover).

Before the creation of the land cover maps, a spectral library consisting of 22 elements was created based on the image information of the hyperspectral data set. By measuring the spectral angle differences, the homogeneity of the different elements (training data sets) was analyzed. By examination accurately (E.g. grass and trees) and inaccurately (E.g. roofs with gray tiles) determined classes were identified. The separability between the different land cover categories was analysed based on their spectral angle difference and the Jeffries-Matusita distance measured in the spectral space. This identified several problematic classes, like for example roof tiles of different colors (red, purple, gray) and asphalt, concrete and basalt paved areas. The creation of the spectral library was described in detail. After creating

the library - every spectra that was used later in the classifications as reference - was compared to other sources and analyzed.

One of the aims of the research is the - separated and also integrated- evaluation of the spatial and spectral information content of data sets to use them in classifications. Based on the results, it can be stated, that segments and height information derived from stereo and high resolution imagery - using only three spectral bands and a proper criteria system - are suitable for the large scale urban land cover mapping. By increasing the dimensions of the feature space, the classification accuracy can be improved further. In this case, it is important to realize that the segmentation parameters and thresholds are derived empirically, and therefore need to be adapted appropriately when the method is applied in a different area.

Land cover mapping based on spectral information can just be successfully applied based on CIR and hyperspectral data. Automatic (ISODATA) and supervised classification (Minimum Distance, Maximum Likelihood and Spectral Angle Mapper) techniques were tested. Maximum 21 categories were identified using the latter ones. Based on the color infrared data, an overall accuracy of 70-80% was reached, depending on the study areas and classification method. In case of the hyperspectral data set, the maximum likelihood classification gave an overall accuracy of more than 85%. The automatic classification methods were mostly successful in the identification of vegetation. Most problematic are the spectrally similar road cover and roof cover classes which resulted in misclassifications. Using thresholds based on the height information, the classification could be improved significantly.

The land cover of the various study areas was thoroughly analyzed during the testing of the different classification methods based on the resulting output maps. Any misclassifications were explained in detail. The proportion of the different land cover classes in the various study areas and their associated mapping problems can be exemplary for areas with similar structure. The classifications resulted in detailed, large scale land cover maps with many classes of the selected areas. These can serve as a basis for urban land use and built-up maps. The possibilities to extend the maps to the complete spatial extent of the city were limited due to the lack of data, the radiometric heterogeneity of the CIR images and limited computer processing power.

Analysis of the main land cover classes show that the grass and tree classes are most accurately classified by the Maximum likelihood classification of the MNF transformed hyperspectral data set. High rise apartment building roofs and other special roof types (schist, metal, plastic) are better classified by the Maximum likelihood method based on PCA transformed data. The tiles with the different colors were most effectively identified using segmentation. To label the image objects, not only the 3 bands of the RGB images were required but the height information from the surface model and the MNF transformed AISA Dual data as well.

Data from the thermal camera was used to identify 4 different categories (soil-vegetation-building-pavement). Only the spatial pattern of the street network, which is much warmer than its surroundings, could be properly delineated. The buildings and vegetated surfaces could not be clearly separated. Apart from the general analysis of the thermal maps from two different dates, more specific analysis of the surface temperature and its influencing factors – mostly the land cover - were executed at 5 characteristic built-up areas.

At the end of this work, several existing and future applications of the used data sources and their derived maps were being discussed. Besides a narrow view on the urban environment, also the larger urban surrounding and supporting rural region were taken into consideration. Current experience shows that the CIR images can be successfully applied in water management (E.g. Inland excess water mapping), while the airborne thermal data is suitable for urban climate research. The orthophoto maps with high spatial resolution improve the tools available to urban management and utilities. Hyperspectral imagery is mostly

applied for the monitoring of green surfaces in the urban environment and not for the creation of detailed land cover maps as presented in this research.

During the creation and the processing of the small format imagery and hyperspectral data, many problems and challenges have been encountered. These have been partly solved in this study. The new experiences can be used in the planning of new data acquisition campaigns to reduce problems. Clear weather conditions and high sun position should have a high priority when executing data collection flights to reduce the negative shadow effect. The disturbing effect of tree canopy covering the surface can be reduced with data acquisition outside vegetation periods. The topographic distortion and covering of lower objects by high buildings can be remediated by the data collection from multiple angles, although this requires more complex processing methods. Ground data collection at the same time or very close to the time of the remote sensing data acquisition is not only useful for atmospheric correction but can also serve as ground truth during the accuracy assessment of classification results. An inertial navigation system (INS), although costly, would considerably improve the accuracy and speed of the georeferencing of the small format imagery. During the definition of the analyzed land cover categories, special attention should be given that the spectral separabilities between the classes are sufficiently large. Hereto, also specific endmember selection procedures can be of help. Besides the traditional classification methods that have been developed for multi-spectral data, further special procedures should be taken into consideration. Since this study is not primarily limited to urban green surfaces, narrow band indices - for which the narrow hyperspectral bands are very suitable - were not tested. Further analysis of the object based procedures may result in improved determination of the segmentation parameters, and may allow for the inclusion of more complex shapes and spatial connections into the classification, next to the spectral and height characteristics that have been used until now.

There are still opportunities for research in data collection, data processing and applications. The rapid technological developments and improvements of the methodology, as well as of user demands need to be followed closely. During recent years, more and more compact instruments for aerial data acquisition - even unpiloted (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) - have emerged. Instead of data collection of just one type of data, nowadays a complex set of data from different instruments, like LIDAR, high resolution color and/or color-infrared cameras, and hyperspectral sensors are acquired simultaneously. The time between data acquisition and interpretation of the processed results is continuously reduced, which allows for near real time data use and decision support.

MELLÉKLETEK

ÁBRAJEGYZÉK

3.1. ábra	CLC50 kategóriák megoszlása Szeged belterületén (1998)	20
3.2. ábra	Szeged belterületének KSH körzeteken alapuló felosztása és a mintaterületek elhelyezkedése	21
3.3. ábra	A mintaterületek kivágata a 10 cm felbontású RGB ortófotó mozaikból (A – Alsóváros, B – Belváros, C – Tarján).....	22
4.1. ábra	Műholdképek (felül) és légifelvételek (alul) térbeli felbontásának szemléltetése a tarjáni mintaterület példáján	23
4.2. ábra	Multispektrális és hiperspektrális szenzor által rögzített spektrumok (Forrás: ITRES / Penn State University)	25
4.3. ábra	A térbeli és spektrális felbontás összefüggése a városi felszínek kutatásában alkalmazott műholdas és légi szenzor példáján.....	26
4.4. ábra	A repülőgép lehetséges elfordulásai a felvételezés során	29
4.5. ábra	A kamerák rögzítése repülőgépen: DuncanTech kamera a poggyásztér ajtóban (balra), Trimble kamera a padlólemezbe süllyesztve (jobbra)	29
4.6. ábra	A CIR felvételező rendszer hardver komponensei	30
4.7. ábra	A DT Contor szoftver kezelőfelülete, melyen a felvételezés közben módosíthatók a legfontosabb beállítások	31
4.8. ábra	A FLIR P65 kamera (jobbra) és egy meddőhányóról készült nyers kép (balra)(Forrás: ATIVIZIG)	31
4.9. ábra	A Trimble Aerial Camera (A: objektív - B: kamera test - C: digitális hátfal - D: vezérlő), az AeroNav Vector modul és a GPS antenna pár (Forrás: Trimble / GGS GmbH)	32
4.10. ábra	Egy CIR felvételezett terület részlete a tervezett és tényleges repülési útvonalakkal, néhány példaképpel és jellemző paraméterrel (Forrás: Tobak et al., 2008b)	33
4.11. ábra	A szegedi felvételezés repülési terve (jobbra) és paraméterei (balra) az AeroTopoL szoftverben. A különböző színezések a képek közötti átfedések számát illusztrálják.....	34
4.12. ábra	Hiperspektrális felvételezések lefedettsége Szegeden	35
4.13. ábra	Digiterra Explorer terepi térképező szoftver asztali verziójának képernyője	37
4.14. ábra	Példa az épületek kidőlése (balra) és a növényzet okozta (jobbra) kitakarásra	38
4.15. ábra	World fájlal durván georeferált felvétel Szeged belvárosából.....	40
4.16. ábra	A pixelértékek (Ts,mért) regressziós egyenese az idő (t) függvényében (2008. aug. 14.) (Forrás: Unger et al. 2010A).....	41
4.17. ábra	A hiperspektrális adatok előfeldolgozásának lépései	42
4.18. ábra	Csak radiometriai (balra), radiometriai és geometriai (középen), illetve atmoszférikus korrekción is átesett (jobbra) AISA Dual felvétel részlet az SZTE BTK és JATIK épületeinek környékéről.....	43
4.19. ábra	A fontosabb felszínborítások reflektanciája a zajos sávok nélkül (zárójelben az átlagolt minták száma).....	46
5.1. ábra	A tanulóterületek pixeleinek és osztályközepének spektrális szögeltérése 22 osztály példáján.....	54
5.2. ábra	Néhány fontosabb anyag pixeleinek elhelyezkedése a PCA transzformált spektrális térben	55
5.3. ábra	A vizsgált (t) és a referencia (r) spektrumok szögeltérésének értelmezése 2 sávós felvétel esetén (balra), illetve az α szögeltérés meghatározása n felvételi sáv esetén (jobbra)	56
5.4. ábra	Növényzeti spektrumok Szeged, Mátyás-térről.....	58
5.5. ábra	Cserép tetőborítások spektrumai Szeged, Belvárosból és Alsóvárosból	58
5.6. ábra	Aszfalt és díszburkolatok spektrumai Szeged, Belvárosból és Alsóvárosból.....	59
5.7. ábra	Felszíni objektum magasságának (Δh) meghatározása sztereo légifelvételek alapján (Forrás: Szatmári, 2004)	60

5.8. ábra	A tarjáni mintaterület digitális felületmodellje (DSM) (balra) és lejtőszög térképe (jobbra)	61
5.9. ábra	A belvárosi mintaterület digitális felületmodellje (balra) és lejtőszög térképe (jobbra)..	62
5.10. ábra	Az objektumok homogenitását befolyásoló tényezők kapcsolatrendszere	64
5.11. ábra	Multiresolution szegmentáció eredménye (fent balra) és az objektumhatárok (fent jobbra) a ferences templom és kolostor CIR felvétele alapján (scale: 50, shape: 0.1, compactness: 0.5), illetve különböző (10-20-50) scale paraméterrel futtatott multiresolution szegmentációk eredményei a Mátyás-tér környékén (lent)	64
5.12. ábra	Képi objektumok (szegmensek) osztályba sorolásának döntési fája	66
5.13. ábra	Az objektumok osztályba sorolásának szabályrendszere az eCognition-ben	67
5.14. ábra	A piros tetők elkülönítése az épületek kategórián belül	67
5.15. ábra	A vegetáció lehatárolása RGB felvételen (balra) Greenness index ($\geq 0,34$) és CIR adatokon (jobbra) NDVI index ($\geq 0,29$) alapján	68
5.16. ábra	Küszöbértékeken alapuló osztályozás eredményei 25 (A), 50 (B), 100 (C) és 200 (D) scale paraméterrel létrehozott szegmensek esetében	68
5.17. ábra	Az RGB, MNF és DSM rétegek felhasználásával futtatott szegmens alapú osztályozás eredménytérképe (balra) és az RGB felvétel kivágat a tanítóterületekkel (jobbra)	69
5.18. ábra	A vektoros épület poligonokból és a CIR képek NDVI osztályozásából származtatott referencia állományok térképe Alsóvárosban (A), Belvárosban (B) és Tarjánban (C)	71
5.19. ábra	A hiperspektrális felvételek ISODATA klaszterezésének eredménye Alsóvárosban az eredeti (A), a PCA (B) és az MNF (C) transzformált sávok alapján	71
5.20. ábra	A hiperspektrális felvételek ISODATA klaszterezésének eredménye a Belvárosban az eredeti (A), a PCA (B) és az MNF (C) transzformált sávok alapján	72
5.21. ábra	A hiperspektrális felvételek ISODATA klaszterezésének eredménye Tarjánban az eredeti (A), a PCA (B) és az MNF (C) transzformált sávok alapján	73
5.22. ábra	A hiperspektrális adatok irányított osztályozása során használt felszínborítási kategóriák és azok jelkulcsa (az 5.5.1.2. fejezet további térképein ezek láthatók).....	74
5.23. ábra	A Maximum Likelihood osztályozó algoritmus működési elve	75
5.24. ábra	A hiperspektárlis adatok Maximum Likelihood osztályozásának eredménye a három mintaterületen az MNF transzformált sávok alapján (jelkulcs: 5.22. ábra)	76
5.25. ábra	A hiperspektrális adatok SAM osztályozásának eredménye az alsóvárosi kivágaton szemlélítve az eredeti sávok alapján 0.1 (A), 0.5 (B) és 1 (C) rad küszöbértéket figyelembe véve (jelkulcs ld. 5.22. ábra)	77
5.26. ábra	NDVI értékek alapján képzett felszínborítási osztályok Alsóvárosban (A), Belvárosban (B) és Tarjánban (C)	78
5.27. ábra	Az ISODATA klaszterezés eredménye (A), a felhasznált referencia térkép (B) és az eredeti CIR (C) felvétel Alsóvárosban.....	79
5.28. ábra	Az ISODATA klaszterezés eredménye (A), a felhasznált referencia térkép (B) és az eredeti CIR (C) felvétel a Belvárosban.....	80
5.29. ábra	Az ISODATA klaszterezés eredménye (A), a felhasznált referencia térkép (B) és az eredeti CIR (C) felvétel Tarjánban	81
5.30. ábra	A CIR adatok irányított osztályozásainak eredménye Alsóvárosban	82
5.31. ábra	A CIR adatok Minimum Distance osztályozásainak eredménye a Belvárosban	83
5.32. ábra	A CIR adatok Minimum Distance osztályozásainak eredménye Tarjánban.....	84
5.33. ábra	A CIR adatok irányított osztályozásainak eredménye Mátyás-téren (Alsóváros)	85
5.34. ábra	Felszínhőmérsékleti kategóriák térképe Alsóvárosban (A), Belvárosban (B) és Tarjánban (C) a 2008. augusztus 12-i felmérés alapján.....	87
5.35. ábra	Tipikus utca keresztszelvény Alsóvárosban	88
5.36. ábra	A kategorizált felszínhőmérsékleti térkép (A) és az Urban Atlas (B) Szeged körtöltésén belüli részén (2008.08.14) (Urban Atlas jelkulcs: 3.1. táblázat)	92

5.37. ábra	A CIR adatok egységes ISODATA klaszterezése Felsővárosban (A) és Petőfitelepen (B)	93
5.38. ábra	CLC50 kategóriák megoszlása a vizsgált városrészekben (1998)	94
5.39. ábra	A felszín hőmérsékleti értékei alapján előállított háromdimenziós térkép Szeged körtöltésen belüli területéről (2008. augusztus 14.)	98

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

3.1. táblázat	Urban Atlas kategóriák megoszlása Szeged belterületén (2006)	20
4.1. táblázat	Az alkalmazott objektív hatása a kisformátumú légifelvétel geometriai tulajdonságaira	24
4.2. táblázat	A tradicionális és a kisformátumú (SPAF) légifelvételezés néhány általános jellemzőjének összehasonlítása	27
4.3. táblázat	A saját adatgyűjtések legfontosabb paraméterei (A – worldTIFF, B – CSV, C – TIFF, D – IMG)	34
4.4. táblázat	AISA Dual felvételezések Szegeden (A - radiancia, 16-bit unsigned integer; B – reflektancia, 32-bit floating point)	36
5.1. táblázat	A vizsgált felszínborítások hierarchikus osztálystruktúrája	53
5.2. táblázat	A legfontosabb osztályok spektrális szeparabilitása SAM és Jeffries-Matusita távolság alapján	56
5.3. táblázat	Átlagmagasságok a referencia réteg zónáiban (ld. 5.5.1.1. fejezet) és a vektoros épület poligonokban (zárójelben) mintaterületekre lebontva, illetve az osztályozásoknál használt magassági küszöbérték (ld. 5.6. fejezet)	62
5.4. táblázat	Az osztályozás megbízhatóságának alakulása különböző méretű (scale) szegmensek és a felhasznált adatrétegek alapján	69
5.5. táblázat	Az NDVI értékek hisztogramjának természetes törései mintaterületenként	78
5.6. táblázat	CIR felvételekből NDVI index értékek felhasználásával definiált kategóriák megoszlási aránya az épület referencia zónában	78
5.7. táblázat	A CIR adatok Minimum Distance osztályozásának értékelése Alsóvárosban	82
5.8. táblázat	A CIR adatok Minimum Distance osztályozásának értékelése a Belvárosban	83
5.9. táblázat	A CIR adatok Minimum Distance osztályozásának értékelése Tarjánban	84
5.10. táblázat	A CIR adatok Maximum Likelihood osztályozásának értékelése Alsóvárosban	85
5.11. táblázat	A CIR adatok Maximum Likelihood osztályozásának értékelése a Belvárosban	86
5.12. táblázat	A CIR adatok Maximum Likelihood osztályozásának értékelése Tarjánban	86
5.13. táblázat	A felszínborítási kategóriák pixeleinek eloszlása az épület és nem épület zónák között az eredeti osztályok és a magassági információk alapján újradefiniált (kettévágott) osztályok alapján	89
5.14. táblázat	Az épület zóna területének megoszlása az eredeti és a magassági információk alapján újradefiniált (kettévágott) osztályok között (CIR adatok, Maximum Likelihood osztályozás)	89
5.15. táblázat	A főbb felszínborítási kategóriák osztályba sorolásának megbízhatósága különböző input adatok és algoritmusok szerint	91